

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РОМАНЮК АНТОН ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.396

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ЗБОРУ ДАНИХ З БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

05.12.02 Телекомунікаційні системи та мережі

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Романюк А.В.

Науковий керівник: Лисенко Олександр Іванович доктор технічних наук,
професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Романюк А.В. Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 „Телекомунікаційні системи та мережі”. – Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” МОН України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі отримали подальший розвиток методи збору даних моніторингу з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування. Отримані результати є вирішенням науково-прикладної задачі підвищення ефективності процесу збору даних з безпроводових сенсорних мереж (БСМ) телекомунікаційними аероплатформами (ТА).

У *першому розділі*: визначені особливості БСМ (велика розмірність, важкодоступність, вузли розміщені на території без телекомунікаційної інфраструктури загального користування або незв'язні) та здійснена їх класифікація; проведений аналіз варіантів архітектур БСМ та процесу збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з використанням телекомунікаційних аероплатформ; проведена класифікація задач управління БСМ з ТА; запропонована функціональна модель системи управління БСМ; визначені цільові функції управління мережею; виконаний аналіз існуючих методів збору даних моніторингу з використанням ТА за двома класами (безпосередній збір даних ТА з кожного вузла мережі та збір даних ТА тільки з головних вузлів кластерів); здійснена постановка завдання наукового дослідження.

За результатами аналітичного огляду встановлено, що більшість запропонованих на сьогодні методів збору даних з БСМ ТА вирішують лише часткові завдання збору даних, не враховують особливості функціонування конкретних мереж, багатокритеріальний характер цільових функцій управління мережею та потребують вдосконалення. Існуючі методи збору даних з

безпроводових сенсорних мереж не завжди прийнятні (в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури, наявності не зв'язних підмереж), а також не ефективні, оскільки призводять до значної витрати енергії батарей вузлів та відповідно малого часу функціонування мережі. Методи збору даних з використанням ТА знаходяться на початковому рівні створення, не враховують наявні ресурси мережі, не вирішують завдання багатоцільового управління (оптимум часу збору даних моніторингу, часу функціонування БСМ, кількості ТА), не дозволяють відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу.

Отже виникає актуальна наукова задача вдосконалення методів збору даних моніторингу з БСМ ТА в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури, важкодоступних та/або незв'язних безпроводових сенсорних мереж, які дозволяли би враховувати наявні ресурси мережі та здійснювати багатоцільове управління.

У другому розділі представлено вдосконалений метод безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з їх кластеризацією ТА.

Відмінність вдосконаленого методу, що визначає його новизну є:

на етапі кластеризації безпроводової сенсорної мережі телекомунікаційними аероплатформами – застосування двох алгоритмів кластерного аналізу FOREL та k -середніх для здійснення віртуальної кластеризації мережі, які, на відміну від відомих адаптують розмір кластера обслуговування телекомунікаційної аероплатформи для забезпечення цільових функцій управління мережею;

на етапі обльоту кластера мережі телекомунікаційною аероплатформою запропоновані правила вибору точок обміну для зменшення витрат енергії вузлів.

Запропонований узагальнений алгоритм реалізації методу безпосереднього збору даних з вузлів БСМ ТА, який включає наступні етапи: побудова заданої (мінімальної) кількості кластерів на основі відомого радіуса покриття ТА і координат положення сенсорних вузлів; побудова маршруту обльоту кластерів; політ та обмін даними ТА з вузлами кластера за визначеними правилами.

У третьому розділі запропонована вдосконалена траєкторно-позиційна модель обміну даними в радіоканалі між ТА і вузлами кластера в русі та позиціонуванні, яка враховує стан вузлів (координаті розташування, рівень енергії

батареї), траєкторію переміщення ТА і визначає графік обміну для забезпечення гарантії обслуговування вузлів.

За рахунок модифікації режимів роботи протоколу канального рівня IEEE 802.11 запропоновано новий гібридний протокол доступу. На етапі доступу вузлів до ТА (децентралізований режим) пріоритет передач вузлів визначається вузлом, які знаходяться на найбільшій відстані між вузлом и траєкторією переміщення ТА. Планування передач вузлів та часу обміну здійснюється централізованим способом.

Запропоновані правила формування графіку обміну між ТА і вузлами кластера, правила корегування базового маршруту обльоту для досягнення різних цільових функцій управління мережею: скорочення часу збору даних, зменшення витрат енергії батарей. Показано, що скорочення часу збору даних за допомогою ТА, збільшення часу функціонування мережі може бути досягнуто за рахунок оптимізації: параметрів переміщення (маршрут, висота, швидкість) або положення у просторі ТА відносно вузлів кластера.

Доведена ефективність моделі обміну даними при різних дисциплінах обслуговування (з гарантією або без гарантії збору даних).

У четвертому розділі запропонований вдосконалений метод збору даних моніторингу ТА з головних вузлів кластеризованої сенсорної мережі, який реалізує основні завдання управління БСМ з кластеризацією: вибір головних вузлів кластерів, знаходження кількості та розмірності кластерів, побудова топології кластера та організація процесу маршрутизації в кластері.

Для цього розроблені аналітичні моделі оцінки часу збору даних ТА, які дозволяють здійснювати планування передач вузлів; оцінювати середню кількість ТА, необхідних для обслуговування БСМ.

Запропонована аналітична модель витрат енергії вузлів при виконанні різних режимів роботи: моніторинг, ретрансляція (маршрутизація), головний вузол. Модель дозволяє прогнозувати витрати енергії вузлів в одному раунді обльоту та здійснювати вибір стратегій обльоту кластера для досягнення заданих цільових функцій управління. Запропоновано вдосконалений алгоритм управління

топологією кластерів БСМ, який передуює процесу маршрутизації. Запропоновані енергоефективні правила побудови топології, які дозволяють в режимі реального часу будувати топологію кластерів, що дозволяє отримувати потенційні маршрути передачі даних між вузлами моніторингу та головними вузлами кластерів.

Запропоновано вдосконалений алгоритм зондової координатної маршрутизації в кластері БСМ, який будує та підтримує маршрути передачі в залежності від цільових функцій управління. Запропоновано використовувати сукупність метрик вибору маршрутів передачі даних між вузлами-моніторингу до головних вузлів (кількість ретрансляцій, відстань, енергія вузла, що витрачається на прийом-передачу даних та залишкова енергія батарей). В залежності від цільової функції управління використовується відповідна множина метрик. В порівнянні з існуючими методами маршрутизації запропонований метод потребує менше службового трафіку за рахунок зондування тільки головним вузлом та дозволяє вирівнювати витрати енергії вузлів кластера.

Розроблено узагальнений алгоритм реалізації методу збору даних з головних вузлів ТА, який реалізує взаємодію алгоритмів управління центру управління мережею, ТА, головних та звичайних вузлів. Проведена оптимізація режимів роботи мережі в залежності від цільових функцій управління.

В н'ятому розділі представлена методика оцінки ефективності методів збору даних з БСМ ТА. Проведено експерименти та отримані залежності в середовищі MATLAB: часу збору даних, часу функціонування мережі від розмірності мережі; витрати енергії вузлів при різній стратегії обльоту. Доведено, що запропоновані вдосконалені методи дозволяють підвищити ефективність процесу збору даних з використанням ТА: скоротити час збору даних, збільшити час функціонування БСМ та зменшити кількість ТА, необхідних для збору даних.

Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, збір даних моніторингу, телекомунікаційні аероплатформи.

ABSTRACT

Romaniuk A.V. Methods of data collection from wireless sensor networks by telecommunication aerial platforms. – Qualification scientific work on the rights of manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences in specialty 05.12.02 „Telecommunication systems and networks” – National Technical University of Ukraine „Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation work has further developed methods of collecting monitoring data from wireless sensor networks by telecommunication aerial platforms in the absence of public telecommunication infrastructure. The obtained results are a solution to the scientific and applied problem of improving the efficiency of wireless sensor networks (WSN) in the implementation of the process of monitoring data collection by telecommunication aerial platforms (TA).

In the first chapter: determined the features of WSN (large dimensionality, difficult accessibility, nodes placed in the territory without public telecommunications infrastructure or unconnected) and carried out their classification; analyzed the options of WSN architectures and the process of collecting monitoring data from wireless sensor network nodes with the use of telecommunications aerial platforms; a classification of control tasks WSN with TA; proposed a functional model of the control system WSN; defined the target functions of network management; performed an analysis of existing methods of collecting monitoring data using TA in two classes (direct collection of TA data from each node of the network and the collection of TA data only from the main nodes of clusters); implemented the problem statement of scientific research.

According to the results of the analytical review, it was found that most of the data collection methods proposed today solve only partial tasks of data collection, do not consider the specifics of the functioning of specific networks, the multi-criteria nature of the target functions of network management and need to be improved. Existing methods of data collection from terrestrial wireless sensor networks are not always acceptable (in the absence of telecommunications infrastructure, non-connected subnetworks), and are

not effective, since they lead to a significant consumption of battery power nodes and therefore the small operation time of the network. Methods of data collection using TA are at the initial level of creation, do not consider the available network resources, do not solve the problem of multi-purpose control (the optimum number of TA, time of collection of monitoring data, time of functioning of WSN), do not allow to work out the obtained solutions in real time.

Thus, there is an urgent scientific problem of improving the methods of TA monitoring data collection in the absence of communication infrastructure, difficult to access and / or unconnected wireless sensor networks, which would allow to consider the available network resources and implement multi-purpose management.

The second chapter presents an improved method of direct collection of monitoring data from wireless sensor network nodes with their clustering by telecommunication aerial platforms.

The difference of the improved method, defines its novelty are:

at the stage of clustering of the wireless sensor network by telecommunications aerial platforms – the use of two algorithms of cluster analysis FOREL and k-means to implement virtual clustering of the network, which, unlike the known adapt the size of the telecommunications aerial platform service cluster to provide the target network management functions.

in the overflight phase of the telecom aerial platform network cluster, the proposed rules for selecting exchange points to reduce the energy consumption of nodes.

Proposed generalized algorithm of data collection from nodes WSN by TA, which includes the following steps: the construction of a given (minimum) number of clusters based on the known radius of coverage of TA and the coordinates of the sensor nodes building cluster flying route and exchange of data TA with nodes in the cluster by certain rules.

The third chapter proposes an improved trajectory-position model of data exchange in the radio channel between TA and cluster nodes in motion and positioning, which considers the state of nodes (location coordinates, battery energy level), the trajectory of

TA movement and determines the schedule of exchange to ensure the maintenance of nodes.

A modification to the IEEE 802.11 link layer protocol modes is proposed - a hybrid access protocol is proposed. At the stage of access nodes TA (decentralized mode) prioritizes transmissions of nodes that are the greatest distance between the node and the trajectory of TA movement. Transmission scheduling and exchange is done in a centralized way.

Proposed rules for formation of exchange schedule between TAs and nodes of the cluster, rules for adjustment of the basic overfly route to achieve various target functions of network management: reduction of data collection time, reduction of battery energy consumption. It is shown that reduction of data acquisition time with TA, increase of network operation time can be achieved by optimizing: movement parameters (route, altitude, speed) or position in space of TA relative to cluster nodes.

The effectiveness of the data exchange model under different service disciplines (with or without data collection guarantee) is proved.

In the fourth chapter, an improved method for collecting TA monitoring data from the main nodes in a clustered network was proposed, which implements the main management tasks of WSN with clustering: selection of the main nodes of clusters, finding the number and dimensionality of clusters, construction of cluster topology and organization of the routing process in the cluster.

To do this, developed analytical models to estimate the time of data collection TA, which allows you to plan the transfer of nodes to estimate the average number of TA required to service WSN.

An analytical model of the energy costs of nodes when performing different modes of operation: monitoring, retransmission (routing), the main node is proposed. The model makes it possible to predict the energy costs of nodes in a single round of overflight and to select cluster overflight strategies to achieve various target control functions. An improved algorithm is proposed for managing the topology of WSN clusters, which precedes the routing process. The proposed energy-efficient topology rules, which allow

real-time construction of cluster topology, allows to obtain potential data transmission routes between monitoring nodes and the main nodes of the clusters.

We propose an improved probe routing algorithm in the WSN cluster, which constructs and maintains transmission routes depending on the target control functions. It is proposed to use a set of metrics for selecting transmission routes between probe nodes to master nodes (number of retransmissions, distance, node energy spent on receiving-transmitting data, and remaining battery capacity). Depending on the target control functions, an appropriate metric is used. Compared to the existing routing methods, the proposed method requires less service traffic due to sensing only the main node and allows to equalize the energy consumption of the nodes in the cluster.

A generalized algorithm for the implementation of the method of data collection from main nodes TA, which implements the interaction of control algorithms of the network control center, , main and conventional nodes, is developed. Optimization of network operation modes depending on target control functions is performed.

The fifth chapter presents the methodology of evaluating the effectiveness of data collection by the TA from WSN in MATLAB environment. The experiments and obtained dependencies of data collection time, time of network functioning on the network dimension, energy consumption of nodes with different flying strategy were carried out. It is proved that the proposed improved methods can improve the efficiency of the data collection process using and: reduce the data collection time, increase the time of the WSN functioning and reduce the number of TA required for data collection.

Keywords: wireless sensor networks, monitoring data collection, telecommunication air platforms.

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

Статті у періодичних наукових виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу

1. Sova O.Y. Hierarchical model of decision acceptance in intelligent manet control system / O.Y. Sova, V.A. Romanyuk, A.V. Romanyuk, O.I. Lysenko, I.V. Uryadnikova // Milan Rastislav Stefanik, Liptovskiy Mikulas. No 1, Vol. 11, 2016. P. 14 – 20. ISSN 1336-8885 (print). ISSN 2453-7632 (on-line). EBSCO. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні структури, параметрів управління в ієрархічній системі управління мережами типу manet).

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Романюк А.В. Алгоритм временной кластеризации узлов беспроводных сенсорных сетей для сбора информации мониторинга с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Міжвідомчий науково-технічний збірник „Адаптивні системи автоматичного управління”, № 2 (33). – 2018. – С. 106 – 117. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164680>.

3. Романюк А.В. Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 4. – 2018. – С. 84 – 91.

4. Романюк А.В. Задачі управління збором даних моніторингу БПЛА в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 2. – 2018. – С. 103 – 112.

5. Романюк А.В. Метод сбора информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ № 1. – 2018. – С. 75 – 85.

6. Романюк А.В. Модели оценки эффективности функционирования беспроводных сенсорных сетей / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 3. – 2017. – С. 125 – 134.

7. Lysenko O. Optimal control of telecommunication airoplatform in the area of emergency / O. Lysenko, S. Valuiskyi, P. Kirchu, A. Romaniuk // *Telecommunication Sciences*. – 2013. – vol. 4. – № 1. – P. 14 – 20. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні правил побудови топології БСМ з використанням ТА).

8. Валуйський С.В. Вдосконалений метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ / С.В. Валуйський, А.В. Романюк, В.Н. Петрова // *Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка»*. – 2014. – Вип. 7. – С. 25 – 34. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні пропозицій по вдосконаленню правил переміщення ТА ля підвищення пропускної здатності ТА).

9. Сова О.Я. Методи обробки знань про ситуацію в мобільних радіомережах класу MANET для побудови вузлових інтелектуальних систем управління / О.Я. Сова, В.А. Романюк, Д.А. Міночкін, А.В. Романюк // *Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ*. – 2014. – № 1. – С. 76 – 84. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні процесу виробки рішень вузловими системами управління).

10. Лисенко О.І. Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища / О.І. Лисенко, К.С. Козелкова, В.І. Новіков, Т.О. Прищеп, А.В. Романюк // *Системи обробки інформації*. – 2015. – Вип. 10 (135). – С. 222 – 226. IndexCopernicus, GoogleScholar. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні функцій та завдань підсистем системи управління БСМ з застосуванням ТА).

11. Жук О.В. Аналіз методів управління топологією в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, Д.В. Ткаченко // *Збірник наукових праць ВІТІ*. – 2017. – № 2. – С. 41 – 47. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів побудови енергоефективної топології БСМ).

12. Жук О.В. Моделі побудови покриття і виявлення цілей в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, В.В. Тарасов, Д.В. Ткаченко // *Збірник*

наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 3. – С. 41 – 48. (Особистий внесок здобувача полягає у побудові та дослідженні математичної моделі покриття цілій в БСМ).

13. Лисенко О.І. Методика оцінки показників функціонування епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами / О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, А.В. Романюк // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Техніка. – 2013. – № 6. – С. 46 – 61. (Особистий внесок здобувача полягає в аналізі показників оцінки функціонування радіомереж з самоорганізацією).

14. Стрела Т.С. Аналіз методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / Т.С. Стрела, О.В. Жук, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ № 3. – 2017. – С. 66 – 75. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів побудови методів енергоефективної маршрутизації в БСМ).

15. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // Математичні машини і системи, – 2017. – № 2. – С. 15 – 23, РІНЦ. ISSN 1028-9763. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні в визначенні задач управління БСМ, побудови нової архітектури управління БСМ).

16. Romaniuk V.A. Increasing the efficiency of data gathering in clustered wireless sensors networks [Електронний ресурс] / V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, A.V. Romaniuk, O.V. Zhuk // Information and Telecommunication Sciences. – №1. – 2020. – р. 102 – 107. – Режим доступу: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/206642>. (Особистий внесок здобувача полягає в пропозиціях про підвищенню ефективності методів збору даних моніторингу в БСМ з застосуванням ТА).

17. Romaniuk A.V. Synthesis of data collection methods by telecommunication airplatforms in wireless sensors networks [Електронний ресурс] / A.V. Romaniuk, V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, M.K. Sparavalo, O.V. Zhuk // Information and Telecommunication Sciences. – № 2. – 2020. – р. 63 – 73. – Режим доступу: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/206642>. (Особистий внесок здобувача полягає у розробці складових синтезу методів збору даних моніторингу з БСМ ТА).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

18. Романюк В.А. Концепция иерархического построения интеллектуальных систем управления тактическими радиосетями класса MANET / В.А. Романюк, О.Я. Сова, П.В. Жук, А.В. Романюк // Сборник тезисов докладов и выступлений участников XXII Международной Крымской конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо 2012). – Севастополь. – 2012. – С. 265. **SCOPUS**. (Особистий внесок здобувача полягає у запропонуванні ідеї інтелектуалізації процесу управління мережами, що самоорганізуються).

19. Лысенко А.И. Синтез рациональной топологии сенсорной радиосети / А.И. Лысенко, С.В. Валуйский, А.В. Романюк // Материалы 23-й международной Крымской конференции (КрыМиКо 2013) „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь. – 2013. – Т. 1. – С. 269 – 270. **SCOPUS**. (Особистий внесок здобувача полягає у пропозиціях по постановці завдання дослідження та проведення моделювання).

20. Романюк А.В. Класифікація задач системи управління епізодичної радіомережі на основі телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк, С.В. Валуйський, О.І. Лисенко // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2015. Київ. – 2015. – С. 381 – 383. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні задач управління БСМ з використанням ТА).

21. Романюк А.В. Використання інтелектуальних систем управління в сенсорних мережах із мобільними сенсорами / А.В. Романюк, О.І. Лисенко // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2016. Київ. – 2016. – С. 465 – 467. (Особистий внесок здобувача полягає у розгляді процесу інтелектуалізації процесу управління БСМ).

22. Романюк В.А. Алгоритм принятия решений по управлению тактической беспроводной сенсорной сетью / В.А. Романюк, А.И. Лысенко, Е.А. Степаненко, А.В. Романюк, А.В. Жук // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2018. Київ. – 2018. – С. 33 – 35.

(Особистий внесок здобувача полягає у розробці узагальненого алгоритму функціонування тактичною БСМ).

23. Романюк А.В. Сбор информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с БПЛА / А.В. Романюк // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2018. Київ. – 2018. – С. 402 – 405.

24. Романюк А. Методи збору даних моніторингу від вузлів безпроводних сенсорних мереж з використанням БПЛА / А. Романюк, О. Лисенко, Т. Стрела // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Перспективи телекомунікацій”. Київ. – 2019. – С. 333 – 335. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів збору даних моніторингу з вузлів БСМ з використанням ТА).

25. Романюк В. Способы повышения эффективности сбора данных мониторинга с использованием БПЛА при кластеризации беспроводных сенсорных сетей / В. Романюк, А. Лысенко, А. Романюк, А. Жук // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Перспективи телекомунікацій”. Київ. – 2020. – С. 310 – 314. (Здобувачем визначені основні напрями та методи підвищення ефективності збору даних з вузлів БСМ при використанні ТА).

26. Lysenko O. Objective control functions of mobile ad-hoc networks using unmanned aerial vehicles / O. Lysenko, S. Danylyuk, A. Romanyuk, V. Romanyuk. // 3rd International Conference: Actual problems of unmanned aerial vehicles developments (APUAVD-2015). October 13-15, 2015. Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv). P. 243 – 246. **SCOPUS**. (Здобувачем запропоновані цільові функції управління ТА).

27. Sova O. New strategies in using network OSI layer in manet functioning / O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, A. Lysenko, I. Uryadnikova // Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany. 22-26.02.2016, Liptovský Mikuláš, Slovakia. P. 359 – 365. ISBN 978-80-8040-515-1. (Особистий внесок здобувача

полягає у проведенні аналізу способів координації різних рівнів моделі OSI мереж з самоорганізацією).

28. Sova O. Intelligent hierarchical model of the sensor and manet networks management system / O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, A. Lysenko, I. Uryadnikova // *Usporiadatel' medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika* Katedra bezpečnosti a obrany. 22-26.02.2016, Liptovsky Mikulas, Slovakia. P. 349 – 358. ISBN 978-80-8040-515-1. (Здобувачем запропонована необхідність інтелектуалізації процесу управління мережами з самоорганізацією).

29. Романюк А.В. Інтелектуалізація сенсорних мереж із мобільними сенсорами / А.В. Романюк, О.І. Лисенко // Четверта міжнародна науково-практична конференція „Відкриті еволюціонуючі системи”. Ніжин. – 2017. – С. 164 – 167. ISBN 978-617-640-267-1. (Здобувачем визначений спосіб інтелектуалізації процесу управління сенсорних мережах з мобільними вузлами).

30. Romanyuk A. The hierarchical model of intelligent control system between intelligent agents in sensor networks and manet / A. Romanyuk, O. Lysenko, V. Romanyuk, O. Sova // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки УкрМіКо'2016 / UkrMiCo'2016, IEEE). ISBN 978-1-5090-4409-2. Київ. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739627. **SCOPUS**. (Здобувачем розглянута ідея побудови інтелектуальних агентів управління в гібридних мережах).

31. Samberg A. The control system of heterogeneous wireless sensor networks / A. Samberg, V. Romaniuk, A. Romaniuk, O. Lysenko, E. Stepanenko // *The International Emergency Management Society Newsletter – Special Edition - ISSUE 5 – April 2017. A TIEMS Special Issue Covering, 12-13 October 2016. TIEMS First Conference in Ukraine*. P. 9 – 14, ISSN 2033-1614. (Здобувачем запропонована структура та функції системи управління неоднорідними БСМ).

32. Романюк А.В. Енергоефективна метрика вибору маршрутів в бездротових сенсорних мережах / А.В. Романюк // VI науково-технічна конференція ВІТІ

„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2012. – С. 184 – 185.

33. Романюк А.В. Вдосконалені правила перерозподілу навантаження епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк // VII науково-технічна конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2014. – С. 156 – 157.

34. Романюк А.В. Інтеграція рівнів OSI в мережі MANET з телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // VIII науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв’язку та автоматизації в АТО”, 2015. – С. 174 – 175.

35. Романюк А.В. Алгоритм синтезу топології епізодичної мережі радіозв’язку з використанням телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк // IX науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв’язку та автоматизації в АТО”, 2016. – С. 159 – 161.

36. Романюк А.В. Моделі оцінки часу функціонування бездротових сенсорних мереж / А.В. Романюк // X науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв’язку та автоматизації в АТО”, 2017. – С. 210.

37. Романюк А.В. Методи збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // XI науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв’язку та автоматизації в АТО”, 2018. – С. 197 – 198.

38. Zhuk A. Methodology of the Tactical Wireless Sensor Networks Control / A. Zhuk, V. Romanyuk, A. Romanyuk, E. Stepanenko // In Proc. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET-2018. (Lviv, 20 – 24 Feb. 2018). p. 201 – 202. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336374. **SCOPUS**. (Здобувачем запропонований алгоритм системи управління тактичною сенсорною мережею).

39. Valuiskyi S. Improved Algorithm for Real Time Search of WSN Routers Placement / S. Valuiskyi, V. Novikov, T. Pryshchepa, A. Romaniuk // 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, Kyiv. 2016. С. 72 – 75. **SCOPUS**. (Здобувачем запропоновані правила розміщення телекомунікаційної аероплатформи, яка виконує функції маршрутизатора).

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

40. Романюк А.В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури / А.В. Романюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 2, 2017. – С. 49 – 54. ISSN 1606-3721.

41. Жук О.В. Використання ефекту стохастичного резонансу під час передачі інформації в безпроводних сенсорних мережах. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського / О.В. Жук, А.В. Романюк, О.В. Байдур // Серія: Техн. науки. Том 28 (67), № 1, 2017. – С. 15 – 18. (Особистий внесок здобувача полягає у пропозиції рішень щодо покращення процесу передачі між сенсорними вузлами).

42. Романюк А.В. Забезпечення стабільності пропускної здатності масштабованих ad-hoc мереж / А.В. Романюк, В.О. Давидюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 1, 2017. – С. 35 – 40. ISSN 1606-3721. (Особистий внесок здобувача полягає у запропонованих рішеннях щодо підвищення пропускної здатності в БСМ).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ ТА МЕТОДІВ ЗБОРУ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ.....	30
1.1 Особливості побудови та функціонування безпроводових сенсорних мереж з використанням телекомунікаційних аероплатформ.....	30
1.1.1 Побудова та класифікація безпроводових сенсорних мереж.....	30
1.1.2 Побудова та класифікація повітряних мереж.....	34
1.1.3 Побудова наземно-повітряної мережі.....	36
1.2 Аналіз задач управління БСМ з ТА.....	38
1.3 Аналіз методів збору даних БСМ із застосуванням ТА.....	44
1.3.1 Методи збору даних з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами.....	45
1.3.2 Траєкторія польоту телекомунікаційних аероплатформ.....	48
1.4 Загальна постановка задачі дослідження.....	50
Висновки до розділу 1.....	59
РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ЗБОРУ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ З ВУЗЛІВ БЕЗПРОВОДОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ З ЇХ КЛАСТЕРИЗАЦІЄЮ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ.....	62
2.1 Постановка завдання та напрями рішення.....	63
2.2 Моделі польоту ТА при зборі даних моніторингу з БСМ.....	65
2.3 Розрахунок точок збору інформації моніторингу	68
2.3.1 Алгоритм FOREL (FORmal ELe ment).....	71

2.3.2. Алгоритм k -середніх.....	74
2.4 Модель розрахунку зони покриття ТА.....	77
2.4.1 Аналіз стандартів передачі даних для використання в БСМ.....	77
2.4.2 Основні характеристики стандарту передачі даних IEEE 802.11.....	79
2.4.3. Оцінка кількості вузлів зони покриття ТА.....	81
2.5. Модель розрахунку часу збору даних ТА з вузлів мережі.....	86
2.7. Узагальнений алгоритм методу безпосереднього збору даних з.....	89
Висновки до розділу 2.....	92
РОЗДІЛ 3. ВДОСКОНАЛЕНА ТРАЄКТОРНО-ПОЗИЦІЙНА МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ МІЖ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЮ АЕРОПЛАТФОРМОЮ ТА ВУЗЛАМИ КЛАСТЕРА.....	95
3.1 Траєкторна модель передачі даних між ТА і вузлами кластера.....	96
3.2 Позиційна модель передачі даних між ТА і вузлами кластера.....	106
Висновки до розділу 3.....	109
РОЗДІЛ 4 ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ЗБОРУ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ З ГОЛОВНИХ ВУЗЛІВ КЛАСТЕРИЗОВАНОЇ БЕЗПРОВОДОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ.....	111
4.1 Постановка завдання.....	112
4.2 Кластеризації вузлами безпроводової сенсорної мережі для збору даних ТА з головних вузлів кластерів.....	114
4.2.1 Аналіз існуючих алгоритмів кластеризації БСМ.....	114
4.2.2 Метрики вибору головних вузлів кластерів.....	117
4.3 Модель розрахунку витрат енергії вузлів мережі при використанні ТА для збору даних моніторингу.....	120
4.4 Алгоритм побудови топології кластерів БСМ.....	124
4.5 Побудова та підтримка маршрутів передачі даних в кластері.....	129

4.6 Алгоритми реалізації методу збору даних телекомунікаційними аероплатформами з головних вузлів з кластеризацією мережі.....	134
Висновки до розділу 4.....	137
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗБОРУ ДАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ З БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	140
5.1 Показники оцінки ефективності функціонування БСМ.....	140
5.2 Методика оцінки ефективності методів збору даних ТА з БСМ.....	142
5.3 Результати моделювання.....	145
Висновки до розділу 5.....	153
ВИСНОВКИ.....	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	159
ДОДАТОК А Список опублікованих праць за темою дисертації	171
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БпЛА	–	безпілотний літальний апарат
БСМ	–	безпроводова сенсорна мережа
ГВК	–	головний вузол кластера
ДО	–	дозвіл на обмін
ЗО	–	запит на обмін
МД	–	множинний доступ
МДКН	–	множинний доступ з контролем несучої
НПМ	–	наземно-повітряна мережа
ПЗ	–	пропускна здатність
ПМ	–	повітряна мережа
СУ	–	система управління
ТА	–	телекомунікаційна аероплатформа
ЦУ	–	центр управління
ЦУМ	–	центр управління мережею
DCF	–	Distributed coordination function
FANET	–	Flying Ad-Hoc Networks
MANET	–	Mobile Ad-hoc Network
NP	–	non polynomial
OSI	–	Open Systems Interconnection (model)
QoS	–	quality of service
PER	–	packet error rate
PCF	–	Point Coordination Function
SNR	–	signal noise ratio
VANET	–	Vehicular Ad-hoc Networks
WMN	–	Wireless Mesh Network
WSN	–	wireless sensor network

ВСТУП

Актуальність теми. В останні роки в усьому світі все більше застосування знаходять безпроводові сенсорні мережі (БСМ, англ. WSN – Wireless Sensor Network) [1 – 4]. Поява БСМ ввела навіть нове поняття „Інтернет речей” [3]. Відповідно до визначення Міжнародного союзу електрозв’язку Інтернет речей – це концепція розвитку мереж зв’язку, що представляє глобальну інфраструктуру для інформаційного суспільства, яка забезпечує можливість надання послуг шляхом з’єднання один з одним (фізичних і віртуальних) пристроїв на основі існуючих і перспективних функціонально сумісних інформаційно-комунікаційних технологій.

Концепція інтернету речей відображає найостанніші тенденції розвитку мереж зв’язку, а саме: включення в глобальну мережу зв’язку різних пристроїв (від побутових приладів до промислового обладнання і різних сенсорних пристроїв), комунікація пристроїв або додатків без безпосередньої участі людини, а також стрімке зростання числа пристроїв, включених в телекомунікаційні мережі [3]. Концепція інтернету речей включає безліч різних додатків, таких як інтелектуальні транспортні системи, електронна охорона здоров’я, „розумний дім”, інтелектуальні електромережі та багато іншого [1 – 4]. Практично всі програми інтернету речей використовують сенсорні пристрої як необхідну частину своєї інфраструктури. Таким чином, БСМ, як значна частина концепції інтернету речей, має великі перспективи розвитку, що підкреслює важливість і нагальну потребу дослідження різних аспектів проектування і функціонування БСМ.

БСМ – це розподілена, самоорганізуюча мережа, що складається з множини вузлів (датчиків, сенсорів), об’єднаних між собою радіоканалами, та здійснює моніторинг параметрів зовнішнього середовища або об’єктів спостереження. Область покриття подібної мережі може становити від декількох метрів до десятків кілометрів за рахунок побудови зв’язної мережі та здатності ретрансляції (маршрутизації) повідомлень від одного вузла до іншого. Основною областю застосування є контроль і моніторинг реальних параметрів фізичних середовищ та об’єктів.

Перевагами даного класу мереж є [1 – 7]: можливість розташування в важкодоступних місцях, куди складно, дорого або неможливо реалізувати проводові рішення; оперативність, зручність розгортання та обслуговування системи; надійність мережі в цілому (в разі виходу з ладу одного або декількох вузлів інформація передається через сусідні вузли); легкість масштабування; тривалий час роботи без втручання людини та ін.

В конструктивному плані основною відмінністю безпроводових сенсорних мереж від радіомереж класу MANET (MESH) є використання в якості вузлів значної кількості надмініатюрних та дешевих пристроїв [1, 4]. Кількість вузлів визначається тільки областю застосування и завдяки низькій вартості може бути значною (сотні, тисячі та більше). В експлуатаційному плані основними відмінностями є, по-перше, специфічні системні вимоги (робота при різних зовнішніх впливах, змінна топологія із-за відмов, переміщення вузлів тощо) та, по-друге, жорсткі вимоги до ресурсів (енергії, продуктивності процесора, пам'яті, радіоканалу тощо).

Для певного класу БСМ (великої розмірності, важкодоступних, розміщених на забруднених територіях, без телекомунікаційної інфраструктури загального користування, незв'язних тощо) виникають значні труднощі або неможливість організації збору даних моніторингу з даних мереж. Застосування в архітектурі мереж даного класу телекомунікаційних аероплатформ (ТА) дозволяє будувати наземно-повітряні мережі та вирішувати це завдання [2, 5 – 7]. Застосування телекомунікаційних аероплатформ дозволяє зв'язати незв'язні фрагменти мереж, значно скоротити час збору даних, збільшити тривалість функціонування мережі тощо.

Однак для реалізації процесу збору даних моніторингу в системі управління даної неоднорідної мережі необхідно реалізувати відповідні методи і алгоритми управління. Запропоновані на сьогодні методи та алгоритми збору даних вирішують лише часткові завдання збору даних, не враховують особливості функціонування конкретних мереж, багатокритеріальний характер цільових функцій управління мережею та потребують удосконалення [7 – 15]. Існуючі

методи збору даних з наземних безпроводових сенсорних мереж не завжди прийнятні (в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування, наявності незв'язних підмереж), а також не ефективні, оскільки призводять до значної витрати енергії вузлів та відповідно малого часу функціонування мережі. Методи збору даних з використанням ТА знаходяться на початковому рівні створення, не враховують наявні ресурси мережі, не вирішують завдання багатоцільового управління (оптимум часу збору даних моніторингу, часу функціонування БСМ, кількості ТА), не дозволяють відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу.

Отже виникає **актуальна наукова задача** – вдосконалення методів збору даних моніторингу з БСМ телекомунікаційними аероплатформами в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування, важкодоступних та/або незв'язних безпроводових сенсорних мереж, які дозволяли би враховувати наявні ресурси мереж та здійснювати багатоцільове управління.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі телекомунікацій інституту телекомунікаційних систем відповідно до плану науково-дослідної роботи КПП ім. Ігоря Сікорського в рамках науково-дослідних робіт: № 0111U04806 „Розробка принципів побудови безпроводових сенсорних мереж із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища” [16] та № 0117U004282 „Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами і телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації” [17], що присвячені підвищенню ефективності функціонування БСМ з використанням ТА.

Мета роботи та завдання дослідження. *Метою роботи є підвищення ефективності процесу збору даних з БСМ телекомунікаційними аероплатформами.*

Відповідно до поставленої мети, в дисертаційній роботі ставилися і вирішувалися такі взаємозалежні *завдання дослідження*:

1. Аналіз задач управління БСМ з використанням ТА, методів та алгоритмів збору даних з БСМ телекомунікаційними аероплатформами.

2. Аналіз математичних моделей: кластеризації БСМ, оцінки енерговитрат вузлів, часу збору даних, передачі даних моніторингу, позиціонування ТА.

4. Вдосконалити алгоритми пошуку положення та переміщення телекомунікаційних аероплатформ для досягнення заданих цілей управління при зборі даних моніторингу.

5. Вдосконалити методи збору даних з БСМ телекомунікаційними аероплатформами.

6. Оцінити ефективність запропонованих методів збору даних з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами.

Об’єкт досліджень – процес функціонування БСМ із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ для збору даних моніторингу.

Предмет досліджень – методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування.

Методи дослідження. При вирішенні сформульованої наукової задачі в дисертаційній роботі були використані методи кластерного аналізу (при кластеризації мережі), теорії графів (при дослідженні аналітичних моделей показників функціонування БСМ із ТА, побудові топології кластерів), теорії телекомунікаційних мереж (при розрахунку пропускної здатності в радіоканалах БСМ із ТА) та теорії оптимізації (при розробці моделі позиціонування положення телекомунікаційних аероплатформ).

Достовірність результатів. Достовірність одержаних результатів і обґрунтованість наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації, забезпечується математичною строгістю та коректністю використання апробованого математичного апарату, системного аналізу, основ теорії масового обслуговування та теорії телекомунікаційних мереж, а також підтверджується збігом результатів теоретичних досліджень та імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. До нових наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, відносяться.

1. Вдосконалений метод безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з їх кластеризацією телекомунікаційними аероплатформами.

Відмінність вдосконаленого методу, що визначає його новизну є:

на етапі кластеризації мережі – застосування двох алгоритмів кластерного аналізу FOREL та k -середніх для здійснення віртуальної кластеризації мережі, які, на відміну від відомих адаптують розмір зони обслуговування телекомунікаційної аероплатформи для забезпечення цільових функцій управління мережею.

на етапі обльоту кластера мережі телекомунікаційною аероплатформою запропоновані правила вибору точок обміну для зменшення витрат енергії вузлів.

2. Вдосконалена траєкторно-позиційна модель передачі даних між телекомунікаційною аероплатформою і вузлами кластера.

Суть вдосконалення моделі, що визначає її новизну є врахування траєкторії та швидкості польоту (точки позиціонування) телекомунікаційної аероплатформи, взаємного розташування наземних вузлів зони її обслуговування при планування їх передач для забезпечення заданої якості обміну даними моніторингу.

3. Вдосконалений метод збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами з головних вузлів кластеризованої БСМ.

Сутність вдосконалення, що визначає його новизну є запропонована нова множина метрик вибору головних вузлів кластерів для досягнення певних цільових функцій управління збором даних моніторингу, у використанні вдосконалених правил знаходження енергоефективних структур кластерів методом спрямованого перебору варіантів та енергозалежних метрик вибору маршрутів при застосуванні зондового координатного методу маршрутизації в кластері.

Практична значимість отриманих результатів. Практичне значення отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів полягає в тому, що розроблені методи, математичні моделі та алгоритми дозволяють:

визначати траєкторію (положення) телекомунікаційних аероплатформ для збору даних моніторингу БСМ для досягнення різних цільових функцій управління мережею в режимі реального часу;

планувати траєкторії переміщення (позиціонування) ТА для обміну даними між ТА і вузлами мережі;

підвищити ефективність алгоритмічного та математичного забезпечення системи управління мережею ТА.

Отримані в дисертації результати можуть бути використані:

1) організаціями-замовниками та науково-дослідними організаціями Міністерства оборони та Державної служби України з надзвичайних ситуацій при розробці тактико-технічних вимог до перспективних БСМ, які використовують телекомунікаційні аероплатформи для збору даних моніторингу;

2) вищими навчальними закладами України, що займаються підготовкою спеціалістів з телекомунікаційних систем.

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в звітах НДР: №0111U04806 „Методи підвищення ефективності телекомунікаційних систем: безпроводові епізодичні мережі із використанням БПЛА” [16], № 0117U004282 „Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації” [17].

Впровадження результатів дослідження. Результати досліджень дисертаційної роботи використані у діяльності державних установ: Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут і Асоціація фахівців цивільного захисту; також впроваджено у навчальний процес кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського (додаток Б), а також реалізовані в науково-дослідних роботах КПІ ім. Ігоря Сікорського: № 0111U04806 „Методи підвищення ефективності телекомунікаційних систем: безпроводові епізодичні мережі із використанням БПЛА”, № 0117U004282 „Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації”.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самотійно. Окрім одноосібних статей [18 – 23], у спільних наукових працях здобувачеві належить наступне: в [24] – метод підвищення пропускної здатності мереж типу MANET за рахунок управління положенням БпЛА у просторі; в [25] – розроблено вдосконалений метод підвищення пропускної здатності радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ; в [26] – здійснено аналіз та класифікацію існуючих методів подання та отримання знань та визначено можливість їх використання при побудові інтелектуальних систем управління вузлами радіомереж класу MANET; в [27] – запропоновано напрями вдосконалення функціональної моделі системи управління БСМ; в [28] – пропонуються нові підходи щодо координації функціонування рівнів OSI в безпроводових мережах типу MANET; в [29] – запропоновано аналіз методів управління топологією БСМ; в [30] – проведено аналіз моделей побудови покриття і моделей виявлення цілей, які використовуються в безпроводових сенсорних мережах; в [31] – запропонована нова архітектура системи управління безпроводовими сенсорними мережами з неоднорідними сенсорами; в [32] – проведено аналіз методів маршрутизації, які використовуються в безпроводових сенсорних мережах, визначено недоліки та переваги зазначених методів та надано рекомендації щодо вдосконалення існуючих методів; в [33] – запропоновані пропозиції щодо архітектури побудови системи управління неоднорідними БСМ за рівнями OSI та функціями управління; в [34] – розглянуто теоретичні підходи до передачі інформації моніторингу в БСМ в умовах радіоперешкод; [35] – сформульована задача досягнення пропускної здатності в кластеризованих сенсорних мережах; в [36] – визначені напрями та методи підвищення ефективності процесу збору даних в БСМ з використанням ТА; в [37] – сформульовані напрями синтезу методів збору даних в БСМ з використанням ТА.

Апробація результатів дослідження. Основні ідеї та результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних кримських конференціях (КриМіКо) „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (м. Севастополь, 2012, 2013pp.) [38, 39], міжнародних науково-технічних конференціях „Проблеми

телекомунікацій” (ІТС НТУУ „КПІ”, м. Київ, 2015...2020 pp.) [40 – 45]; міжнародній конференції „Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments” (IEEE APUAVD) (НАУ, Київ, 2015 p) [46]; міжнародній науковій конференції „Science & Military” (Академія Збройних Сил Генерала Мілана Растіслава Штефаніка, Липтовський Мікулаш, Словаччина, 2016 p.) [47, 48]; міжнародній науково-практичній конференції „Відкриті еволюціонуючі системи” (НАТІ, Ніжин, 2017) [49]; міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо), м. Київ, 2016p [50]; міжнародній конференції „The International Emergency Management Society Newsletter”, 2016 (Ukraine) [51]; науково-практичних семінарах та конференціях „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” (БІТІ, м. Київ, 2012...2018 pp.) [52 – 57], міжнародній конференції „14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET-2018”. (Lviv, 20 – 24 Feb. 2018) [58], міжнародної конференції 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), м. Київ, 2016 [59].

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 42 роботах, з них: 17 статей у наукових фахових виданнях, в тому числі 1 стаття у періодичних наукових фахових виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу, 16 статей у фахових виданнях, наведених у переліку МОН України, 5 одноосібних статей; 22 тези доповідей, з них 6 тез містяться в наукометричній базі SCOPUS; 3 статті додатково відображають результати дисертації.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг становить 158 сторінок, 52 рисунка, 10 таблиць, 2 додатки на 14 сторінках та список використаних джерел, що містить 97 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ ТА МЕТОДІВ ЗБОРУ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ

Даний розділ присвячено аналізу особливостей побудови та функціонування безпроводових сенсорних мереж з використанням телекомунікаційних аероплатформ для збору даних моніторингу. Крім того проведено аналіз задач управління мережею та існуючих методів збору даних моніторингу безпроводових сенсорних мереж із застосуванням ТА. Визначена задача дослідження та напрями її рішення, зроблена постановка завдання у формалізованому вигляді.

1.1 Особливості побудови та функціонування безпроводових сенсорних мереж з використанням телекомунікаційних аероплатформ

1.1.1 Побудова та класифікація безпроводових сенсорних мереж

Безпроводові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks) – розподілені мережі, що складаються з маленьких вузлів (сенсорів), з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки та передачі даних. Основними елементами сенсорних вузлів є (рис. 1.1): датчики контролю параметрів зовнішнього середовища, мікрокомп'ютер, батарея, прийомопередавач (можливо наявність системи позиціонування) [1 – 4].

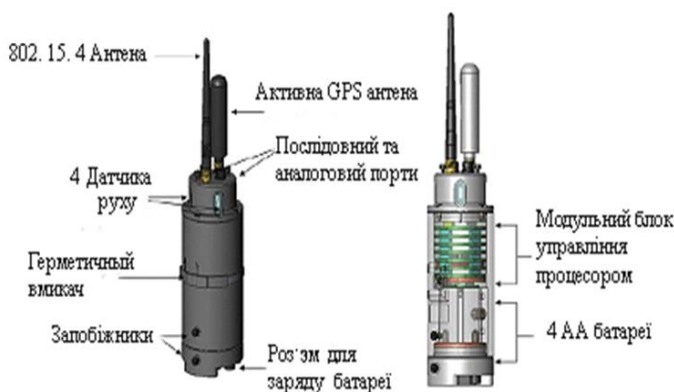


Рисунок 1.1 – Приклад складу сенсорного вузла

Сенсорні вузли працюють автономно (мають власну систему управління) та здійснюють збір інформації моніторингу: параметри навколишнього середовища (вологість, температура, шум, тиск, рівень забруднення, рівень радіації тощо) або параметри об'єктів моніторингу (трубопроводів, мостів тощо).

Наприклад, БСМ можуть використовуватися для спостереження за лісовими масивами, полями сільськогосподарського призначення, кордонами, для здійснення екологічного та метеорологічного моніторингу, пошуково-рятувальних місій, у військових місіях тощо [1 – 7].

Сукупність сенсорних вузлів створюють безпроводові сенсорні мережі. Характерними особливостями БСМ є значна розмірність (сотні, тисячі вузлів), обмеженість ресурсів вузлів (за енергією батареї, продуктивністю процесора, обсягом пам'яті, потужністю передавача, пропускної спроможності радіоканалу тощо), концентрація трафіка біля шлюзу тощо [1 – 7, 17, 18]. Мережа може бути призначена для роботи протягом декількох місяців або навіть років в важкодоступних районах. При цьому заміна батарей вузлів мережі може бути непрактичною або навіть не можливою. Отже, управління споживанням енергії сенсорними вузлами (зменшення, збереження, перерозподіл між вузлами) має вирішальне значення для збільшення часу їх функціонування та мережі в цілому.

В залежності від призначення, розмірності, кількості та типу параметрів моніторингу, мобільності, організації управління та збору даних БСМ класифікуються (рис. 1.2) [4].



Рисунок 1.2 – Класифікація безпроводових сенсорних мереж

По мобільності БСМ поділяються на стаціонарні, рухомі та гібридні сенсорні мережі. Можуть використовуватися стаціонарні сенсорні вузли та/або рухомі сенсори-роботи, сенсори-БпЛА. Рухомі сенсори можуть виконувати як функцію збору інформації моніторингу так і функцію збору інформації зі стаціонарних сенсорних вузлів. Мобільні сенсорні мережі, які самоорганізуються, відносяться до класу MANET (Mobile ad-hoc networks) [4], а стаціонарні – до класу чарункових безпроводових мереж WMN (Wireless Mesh Network) [4].

По організації управління – децентралізовані, ієрархічні та гібридні сенсорні мережі. Ієрархічна організація мережі припускає розбиття мережі на зони (кластери) з виділенням в кожній зоні головних і звичайних сенсорів-вузлів, а також сенсорів-шлюзів (для зв'язку між кластерами). Вона є комбінацією централізованого (у кластерах) і децентралізованого (між головними вузлами кластерів) способів управління.

По середовищу моніторингу – наземні, підземні, надводні, підводні, повітряні.

По параметру моніторингу – акустичні, вібраційні, хімічні, радіаційні, оптичні тощо.

Архітектура БСМ, яка визначає процедури збору інформації моніторингу з вузлів мережі, може бути реалізована наступними способами (при наявності телекомунікаційної інфраструктури – шлюзи, базові станції тощо).

1. Інформація моніторингу передається вузлами безпосередньо до шлюзу.

а) однорангова мережа – всі вузли виконують однакові функції моніторингу та передачі даних – кожен вузол безпосередньо передає дані до шлюзу (або базової станції) (рис. 1.3а);

б) ієрархічна – мережа поділяється на кластери, в кожному з них визначається головний вузол кластера, який збирає інформацію моніторингу (може здійснювати її агрегацію) вузлів кластера та передає ці дані безпосередньо до шлюзу (рис. 1.3б). Для різних БСМ розмір та розмірність кластерів буде визначатися особливостями функціонування та ці параметри повинні бути визначені на етапі планування мережі.

2. Інформація моніторингу передається по сформованим маршрутам передачі до шлюзу:

- а) однорангова мережа – між кожним вузлом та шлюзом (рис. 1.3в);
- б) ієрархічна – між головними вузлами кластерів та шлюзом (рис. 1.3г).

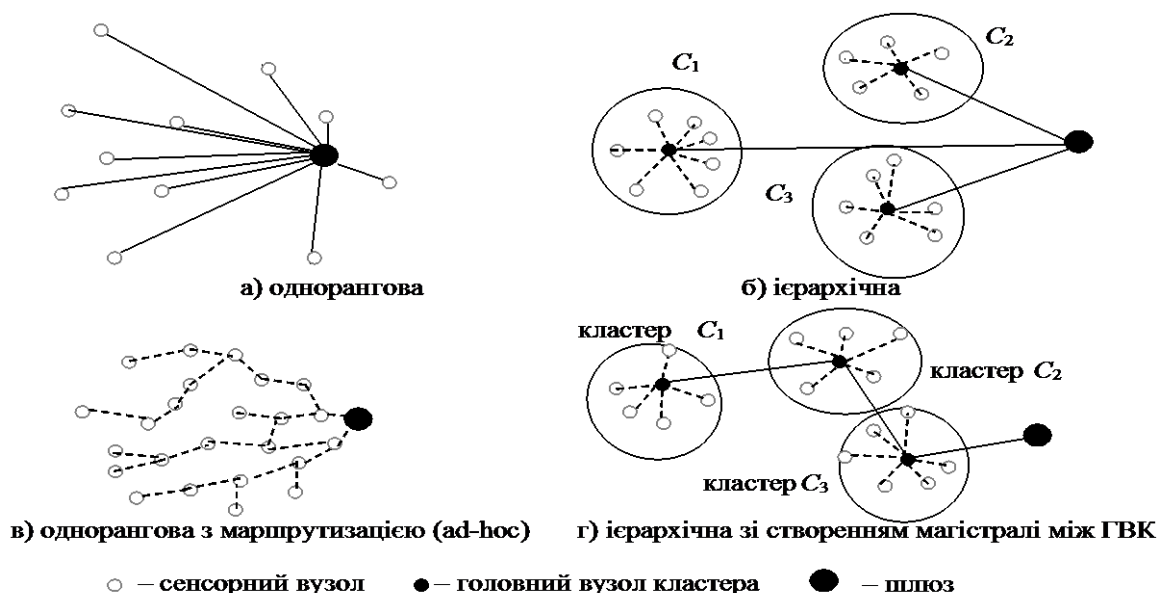


Рисунок 1.3 – Способи збору даних моніторингу в БСМ

Перевагою 1а способу є низька обчислювальна складність алгоритмів збору (відповідно вартість сенсорних вузлів), однак така архітектура приводить до значних витрат енергії батарей вузлів та малого часу функціонування мережі.

Здійснення кластеризації та агрегація даних (1б спосіб) головними вузлами в кластерах (ГВК) дозволяє зменшити енерговитрати вузлів на передачу даних моніторингу, однак потребує реалізації додаткових алгоритмів кластеризації, та, відповідно, додаткового службового трафіку та витрат енергії батарей вузлів.

Побудова маршрутів в одноранговій мережі дозволяє (2а спосіб) значно зменшити енерговитрати вузлів (за рахунок скорочення відстані між вузлами та, відповідно, зменшення витрат енергії на передачу), однак це приведе до: значного службового трафіку особливо в мережах значної розмірності (відповідно збільшення енерговитрат вузлів); побудови маршрутів значної довжини; перенавантаження вузлів біля шлюзів та якнайшвидшому виходу їх з ладу; необхідності реалізації мережевих алгоритмів маршрутизації та управління

трафіком, реалізації режиму самоорганізації тощо. Всі ці фактори значно підвищують вимоги до обчислювальної продуктивності вузлів, збільшують вартість вузлів та БСМ в цілому.

Побудова ієрархічного управління (2б спосіб) з передачею даних моніторингу по побудованим маршрутам між головними вузлами дозволяє зменшити обсяг службового трафіку відносно попереднього способу, однак потребує реалізації додаткових алгоритмів управління (створення, підтримка кластерів; вибору головних вузлів кластерів; побудови магістралей передачі даних, їх перебудови для рівномірної витрати енергії вузлами тощо).

Ключовими недоліками всіх цих способів є, по-перше, неможливість збору даних в випадках: відсутності зв'язності між вузлами, наявності незв'язних підмереж, відмови „критичних” вузлів в маршрутах передачі, відсутності наявної телекомунікаційної інфраструктури загального користування в межах БСМ (шлюзів, базових станцій); по-друге – відносно малий час функціонування БСМ.

Одним із варіантів зниження енерговитрат вузлів БСМ є застосування мобільних шлюзів на базі мережі транспортних засобів (мережі типу Vehicular ad-hoc networks, VANET). Наприклад, в найпростішому випадку транспортні засоби громадського транспорту можуть використовуватися для збору даних з сенсорів в містах. Однак цей спосіб має значні недоліки та обмеження в застосуванні: потенційна залежність від стану шляхів руху та їх завантаженості, технічна обмеженість автозасобів, проблема з отриманням радіозв'язку прямої видимості тощо. Застосування телекомунікаційних аероплатформ в якості повітряних шлюзів дозволяє вирішити ці проблеми [5 – 7]. Вони мають значну перевагу над VANET: малий час збору, не потребує спеціальних маршрутів, більша зона покриття, наявність прямої видимості між ТА і вузлом тощо.

1.1.2 Побудова та класифікація повітряних мереж

У багатьох країнах світу, в тому числі в Україні, проводяться дослідження із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в якості телекомунікаційних аероплатформ (повітряних базових станцій, шлюзів, маршрутизаторів,

ретрансляторів), здатних на вимогу надавати безпроводовий зв'язок в потрібні райони [4 – 6, 7, 15]. Завдяки мобільності, оперативності, адаптації швидкості та висоти польоту, ТА можуть ефективно доповнювати як існуючі наземні мережі зв'язку так і безпроводові сенсорні мережі (забезпечити зв'язність, додаткову пропускну здатність, покриття важкодоступних районів, збір даних моніторингу тощо).

Найбільш важливими перевагами використання ТА є, по-перше, можливість забезпечити зв'язок в реальному масштабі часу або збір даних без наявності будь-якої телекомунікаційної інфраструктури і по-друге – можливість отримання радіоканалів прямої видимості. Сукупність ТА будуть створювати повітряні мережі (ПМ) типу FANET (Flying Ad-Hoc Networks) [4 – 6].

ПМ можуть бути побудовані на БпЛА різних типів, що відрізняються за своїми технічними характеристиками: маса, висота, швидкість і час польоту, вага корисного навантаження, тип силової установки, способи запуску і приземлення, радіус дії, режим управління, ціна, літаковий або вертолітний тип та ін. Умовно БпЛА зазвичай поділяють на три великі категорії (рис. 1.4): дистанційні пілотовані апарати, автоматичні та гібридні. В цих категоріях вони поділяються на мікро, міні, середні, важкі. Належність БпЛА до того чи іншого класу визначають по масі, дальності та висоті польоту, часу, який апарат здатний провести в повітрі.

Організація управління ПМ може бути реалізована централізованим, децентралізованим або змішаним способами. По можливості виконання завдань без управління з наземного центру управління (ЦУ) повітряні мережі можуть поділятися на автономні та неавтономні.

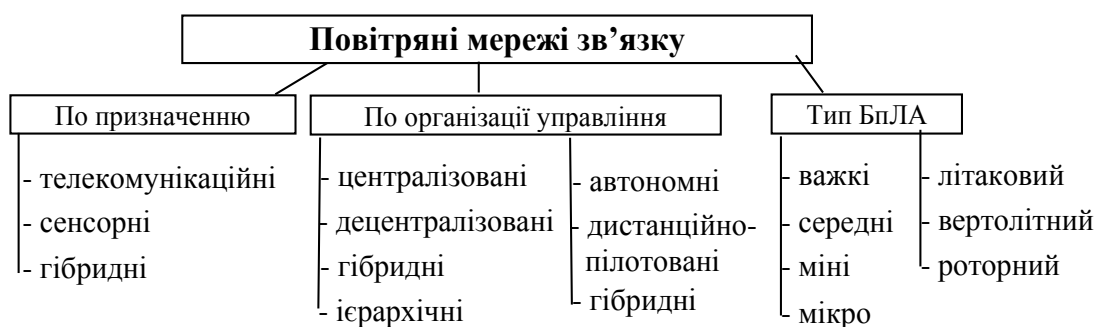


Рисунок 1.4 – Класифікація повітряних мереж зв'язку

Однак, застосування ТА на базі БпЛА передбачає вирішення ряду оптимізаційних задач планування, розгортання та оперативного управління: тривимірною розгортання ТА; розрахунку часу та траєкторії польоту; якістю збору даних та процесу інформаційного обміну, витратами ресурсів мережі тощо.

1.1.3 Побудова наземно-повітряної мережі

Застосування телекомунікаційних аероплатформ, що реалізують сучасні технології безпроводових мереж, дозволяє будувати нові *наземно-повітряні архітектури* систем радіозв'язку [4 – 6]. Наземно-повітряна мережа (НПМ) складається з двох взаємодіючих між собою сегментів: повітряного та наземного (рис. 1.6).

В якості повітряної мережі виступає мережа ТА. Кожна ТА з точки зору зв'язку оснащується відповідною системою управління, двома комплектами прийомо-передавальної апаратури та антенних систем (1-й комплект – для зв'язку ТА з наземними вузлами; 2-й – для радіозв'язку між телекомунікаційними аероплатформами або ТА з наземним центром управління через телекомунікаційну інфраструктуру загального користування), маршрутизатором, запам'ятовуючим пристроєм, GPS-навігатором.

Наземний сегмент являє собою сукупність безпроводових сенсорних вузлів (мереж), розгорнутих в зоні моніторингу. Сенсорні вузли цих мереж можуть як підтримувати самоорганізуючі протоколи безпроводових технологій (наприклад, ZigBee, IEEE 802.11 тощо) та організовувати підмережі або кластери (кластери 1 та 2 на рис. 1.6), так і не підтримувати самоорганізацію вузлів (наприклад, IEEE 802.11, RFID, LoRa тощо) (кластер 3 на рис. 1.6) [7]. В першому випадку ТА збирають дані з головних вузлів кластерів (ГВК), в другому – безпосередньо з кожного вузла. Зв'язок між двома сегментами (ТА-вузли) може бути підтриманий за протоколами IEEE 802.11, ZigBee, 6LoWPAN, Thread, RPL, BLE тощо. Крім цього, слід врахувати необхідність збереження цілісності інформації, яка збирається з вузлів. Для цього ТА повинні об'єднуватися в групи для розподіленого збереження інформації в випадку виходу з ладу деяких ТА.

Траєкторія польоту або баражування ТА розраховується центром управління на етапі планування. ТА здійснюють політ, збирають дані з сенсорних вузлів та передають їх на базову станцію або сервер збереження за допомогою стандартів стільникових мереж або інших сучасних протоколів стандартів IEEE 802.15.4, IEEE 802.11 тощо (рис. 1.5).

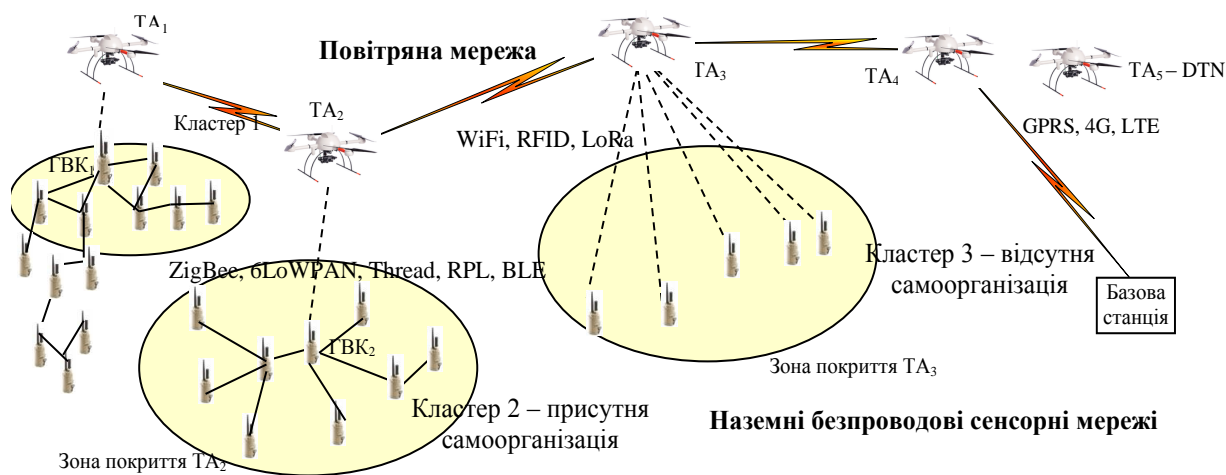


Рисунок 1.5 – Архітектура наземно-повітряної мережі

У багатьох випадках сенсорні вузли можуть бути розгорнуті на поверхні землі (води) у віддалених (важкодоступних або недоступних) районах, в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування. В таких умовах для збору даних моніторингу від сенсорних вузлів доцільне використання ТА в якості повітряних вузлів-шлюзів. При цьому розрізняють два способи збору даних моніторингу з вузлів мережі ТА (рис. 1.5).

1. БСМ з затримкою отримання даних моніторингу (Delay Tolerant Networks, DTN). При цьому способі сенсорні вузли здійснюють моніторинг середовища, зберігають отримані дані та чекають можливості їх передачі на ТА при появі її в межах радіозв'язку. ТА облітає за певним маршрутом територію моніторингу (точки збору даних), встановлює радіозв'язок з сенсорними вузлами, здійснює обмін даними моніторингу, зберігає їх і, по поверненню в вихідну (задану) точку польоту, передає їх в центр обробки даних.

2. БСМ реального часу. У цих мережах ТА постійно баражує в заданому районі, підтримує радіозв'язок з сенсорними вузлами свого кластера, приймає від

них дані моніторингу (або сама виступає в якості мобільного сенсору) і передає їх через базову станцію (при відсутності радіозв'язку з базовою станцією через повітряну мережу) в центр збору даних для їх подальшого аналізу.

1.2 Аналіз задач управління БСМ з ТА

За етапами задачі управління БСМ з ТА діляться на задачі планування, розгортання (організаційний спосіб реалізації) і оперативного управління (організаційно-технологічний спосіб) [20, 40, 42, 46, 51] (рис. 1.7).

Етап планування здійснюється центром управління мережею (ЦУМ). Змістом планування є (виходячи із прогнозованої обстановки та наявних ресурсів):

1. Планування наземного та повітряного сегментів мережі (кількість вузлів наземної мережі та положення їх розміщення; кількість ТА, визначення їх траєкторії або позиціонування в просторі), яке реалізує певну мету управління мережею, виходячи з вимог до призначення, параметрів мережі, вимог до збору даних моніторингу. Планування точок збору даних ТА і маршруту польоту тощо.

2. Розподіл ресурсів наземної та повітряної мережі, вибір конкретних параметрів і режимів роботи технічних засобів (параметри моніторингу, параметри збору та передачі даних, методи та алгоритми управління за функціями управління тощо).

Етап розгортання полягає в: розміщенні (детерміновано або випадково) на території моніторингу наземних вузлів, ініціалізації мережі БСМ, запуску необхідної кількості ТА, управлінні їх польотом у задані точки збору даних.

Задачі етапу розгортання мереж також будуть реалізовуватися на етапі оперативного управління при значних змінах БСМ (знищенні або введенні нових вузлів, додавання нових зон моніторингу та ін.). Управління польотом ТА, роботою їх бортових систем здійснюється з ЦУМ.

На етапі оперативного управління за прийнятими показниками оцінки ефективності постійно оцінюється стан мережі, і визначаються управляючі впливи

(відповідно до реальних обставин, цільових функцій та наявних ресурсів) по втриманню показників її функціонування в певних обмеженнях або їх оптимізації. Задачі оперативного управління вирішуються централізованим або децентралізованим способами у режимі реального часу.

За функціями задачі управління БСМ з ТА поділяються на наступні групи (рис. 1.6):



Рисунок 1.6 – Класифікація задач управління БСМ з ТА

1. Задачі переміщення ТА – визначення траєкторій польоту групи (окремого) ТА і координація їх дій.

2. Задачі управління мережею для забезпечення інформаційного обміну [4]. До них відносяться задачі управління: побудовою та підтримкою топологією [29], маршрутизацією [32], навантаженням, радіоресурсом, витратами енергоресурсів вузлів і ТА, якістю обслуговування тощо.

3. Задачі покриття – вирішують задачу розміщення сенсорних вузлів (стаціонарних, мобільних) для забезпечення заданої якості покриття [30].

4. Задачі моніторингу – визначають параметри моніторингу (зона покриття, об'єкт, час, інтенсивність збору даних тощо), які визначають тип, інтенсивність та об'єм інформації моніторингу.

5. Задачі збору даних визначаються архітектурою мережі та відповідними методами (алгоритмами) збору даних моніторингу [43, 44] .

За охопленням – в якості об’єкту управління може виступати вся наземно-повітряна мережа, її наземний або повітряний сегменти, певна зона (кластер) БСМ, напрямок, маршрут, радіоканал передачі, сукупність або окремий сенсорний вузол, ТА.

За цільовими функціями. В умовах змішаного управління (частка функцій виконується централізовано центром управління НПМ, а друга децентралізовано – вузлами) можна визначити дві взаємозалежні групи цілей [21, 27, 46]:

мережеві (зонові) – оптимізація мережевих або зонових показників ефективності;

вузлові – досягнення заданої якості передачі в певному радіоканалі, маршруті, напряму між сенсорними вузлами, сенсорними вузлами і ТА.

До мережевих (зонових) цілей управління можна віднести оптимум наступних параметрів $Z_i = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$:

Z_1 – зв’язність (структурна надійність) мережі, її сегментів, зон;

Z_2 – якість (ступінь) покриття території моніторингу сенсорними вузлами (рухомими чи стаціонарними);

Z_3 – час збору даних моніторингу;

Z_4 – час функціонування наземного та/або повітряного сегментів;

Z_5 – кількість ресурсів (стаціонарних та мобільних сенсорів, ТА тощо), які необхідно задіяти до досягнення певної мети;

Z_6 – витрати енергії вузлами на прийом-передачу в радіоканалах, на моніторинг, тощо;

Z_7 – якість інформаційного обміну (продуктивність, час затримки передачі тощо) НПМ, сегментів, зон, напрямів, маршрутів, радіоканалів;

Z_8 – обсяг службового трафіка, який генерується для організації алгоритмів управління (наприклад, алгоритмів збору інформації моніторингу, стану мережі) тощо.

Основними обмеженнями при цьому є як ресурси та параметри сенсорних вузлів наземної мережі (енергія батарей живлення, пропускна здатність радіоканалів, дальність радіозв'язку, об'єми пам'яті, швидкість обробки інформації процесорами, наявність алгоритмів управління тощо), так ресурси та параметри ТА.

Функціональна модель системи управління НПМ представлена на рисунку 1.7, яка являє собою ієрархію взаємодіючих систем управління (СУ): ЦУМ, СУ ТА, СУ вузлів [27, 28, 33, 50, 51].



Рисунок 1. 7 – Функціональна модель системи оперативного управління НПМ

В кожному сенсорному вузлі реалізована система управління, яка здатна кооперовано с іншими наземними та повітряними вузлами приймати рішення по забезпеченню заданої якості покриття, моніторингу, енергозбереження, збору та передачі даних. При цьому, управляючі впливи вузлових СУ здійснюються шляхом реалізації циклу управління (збір та аналіз інформації про стан мережі, ідентифікація ситуації про стан мережі та прийняття управляючого рішення по забезпеченню якості покриття, моніторингу, збору та передачі даних) на основі цільових функцій управління.

Слід зауважити, що, з урахуванням різноманітності параметрів сенсорних вузлів, при визначенні цільової функції сенсорного вузла, його система управління також повинна враховувати цільові функції вузлів-сусідів, і цільову функцію управління всією БСМ (чи її зоною).

Система управління БСМ (рис. 1.8) [26, 28, 31, 33, 49, 58]:

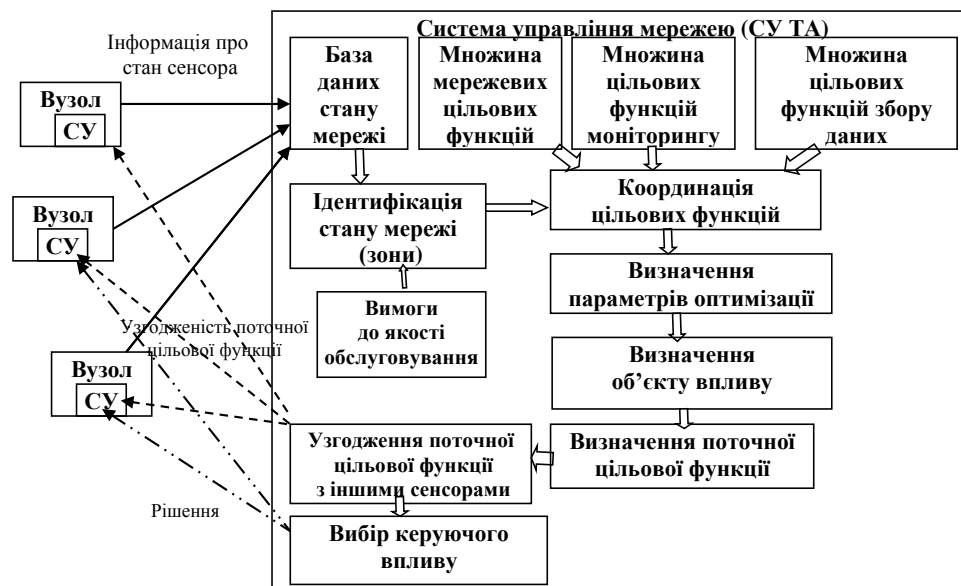


Рисунок 1.8 – Ієрархія процесу прийняття рішення системою управління

визначає поточну множину параметрів оптимізації – мережевих і вузлових;
визначає об'єкти управління (вузол, зона, напрямок);
визначає поточну цільову функцію (функції) управління (мінімум часу збору даних, мінімум витрат енергії тощо);

узгоджує (координує) цільову функцію з сусідніми сенсорними вузлами (якщо вузли одного рангу) або призначає її підпорядкованим сенсорним вузлам (якщо це центр управління БСМ або головний вузол кластера БСМ);

вибирає керуючу дію за етапами.

Розглянемо основні функціональні підсистеми СУ [18, 46, 51]:

підсистема управління польотом керує переміщенням ТА і режимами їх роботи;

підсистема управління покриттям та моніторингу визначає тип покриття (об'єкт, площа, бар'єр), способи розміщення вузлів, показники покриття, здійснює розрахунок сесій спостереження тощо;

підсистема управління витратами енергоресурсу вузлів спрямована на мінімізацію споживання енергії вузлами мережі та максимізацію часу функціонування мережі при виконанні вимог щодо постійного покриття району моніторингу та вимог інформаційного обміну;

підсистема телекомунікацій забезпечує процес обміну даними між вузлами мережі та між вузлами з ТА з заданою якістю;

підсистема координації та реалізації рішень здійснює оптимізацію показників ефективності за кожним рівнем моделі OSI при різних умовах функціонування мережі та вимогам до якості моніторингу і конкретного типу трафіка.

При реалізації оперативного управління БСМ пропонується вироблення рішень СУ здійснювати за функціями управління на різних рівнях моделі OSI (рис. 1.9) [31, 33, 47].

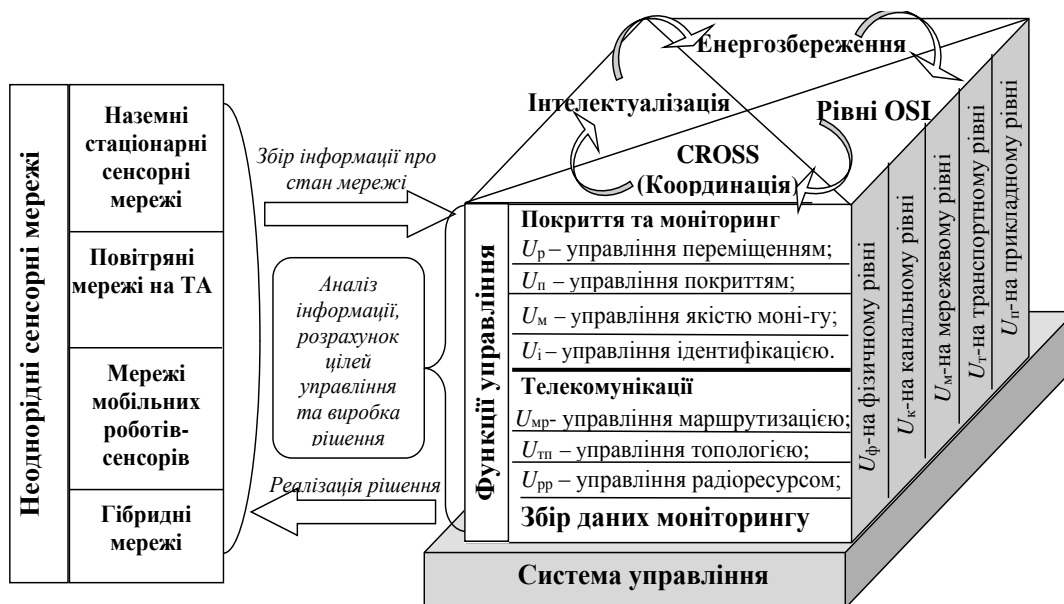


Рисунок 1.9 – Рівні та функції системи оперативного управління НПМ

Визначимо особливості задач управління НПМ (рис. 1.8):

реалізуються на різних етапах управління мережею (планування, розгортання або відновлення, оперативне управління);

відрізняються за функціями: переміщення ТА (управління маршрутом руху, координація польоту групи ТА, визначення району баражування, тощо);

покриття зони моніторингу; забезпечення якості збору та передачі даних;

різні об'єкти впливу (вся БСМ, окрема зона БСМ, напрямки передачі інформації, маршрут, канал, сенсорний вузол), що вимагає узгодження та координації цільових функцій;

різні цільові функції, які можуть заперечувати одна одну;

різні математичні постановки цільових функцій (задачі кластеризації, побудови маршрутів переміщення тощо);

висока розмірність та динамічний характер;

неповнота та часто недостовірність контрольної інформації про стан БСМ та її елементів;

взаємозалежність задач управління;

відношення до різних рівнів еталонної моделі OSI.

1.3 Аналіз методів збору даних БСМ із застосуванням ТА

В роботі розглядаються БСМ з ТА класу DTN, які збирають дані моніторингу з певною затримкою. Крім цього у нашому випадку передача даних моніторингу від вузлів до стаціонарного шлюзу неможлива через відсутність телекомунікаційної інфраструктури загального користування або обмежену дальність радіозв'язку між вузлами. Тому збір даних з сенсорних вузлів здійснюється за допомогою телекомунікаційних аероплатформ, оснащених відповідним обладнанням. Кожна ТА містить наступні основні елементи: систему управління польотом, два прийомопередавача (зв'язки вузол-ТА, ТА-ТА або ТА-наземний центр управління), систему зберігання даних, систему управління збором даних, реалізовану у вигляді спеціалізованого програмного забезпечення.

Основні етапи процесу збору даних моніторингу з сенсорних вузлів з використанням ТА є [7 – 14, 18, 22]:

1. Збір даних центром управління (або ТА) про стан мережі.

На початковому етапі ТА здійснює обліт всієї території моніторингу та збір даних про параметри вузлів мережі (координати розміщення, енергія батарей, обсяг даних моніторингу та ін.), в подальшому – збір даних про параметри вузлів здійснюється при кожному раунді збору даних ТА.

2. Розрахунок центром управління (або ТА в умовах відсутності зв'язку з центром управління) точок збору даних ТА з вузлів мережі .

3. Побудова центром управління (або ТА) маршруту польоту за обраними точками збору даних [7, 60, 61].

4. Політ ТА по маршруту, збір інформації моніторингу в обраних точках з вузлів мережі.

5. Приліт ТА в кінцеву точку і передача інформації моніторингу з ТА в центр збору даних моніторингу, також передача ТА в наземний центр управління службової інформації про стан вузлів мережі.

1.3.1 Методи збору даних з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами

Існують два основних методи збору інформації моніторингу з вузлів БСМ з використанням ТА в якості мобільного повітряного шлюзу [2, 8 – 18, 22]:

прямий (безпосередній) збір ТА інформації моніторингу з кожного вузла мережі;

збір ТА інформації моніторингу з виділених головних вузлів кластеризованої мережі.

Розглянемо їх більш детально.

1. Прямий (безпосередній) збір ТА інформації моніторингу з кожного вузла мережі [2, 7, 8, 11, 12, 15, 18].

При цьому методі ТА облітає всю територію моніторингу (або окремо кожний вузол мережі) за розрахованим маршрутом, збирає та зберігає дані моніторингу з кожного сенсорного вузла. Переваги даного методу: відносно мала витрата енергії сенсорного вузла на передачу даних (в умовах незначної відстані між ним і ТА), мала затримка передачі даних (одна ретрансляція). Недоліки: значні

довжина маршруту і час польоту ТА (що визначає підвищені вимоги до характеристик БпЛА) і, відповідно, значний час збору інформації моніторингу мережі. Даний метод може використовуватися при початковому обльоті території, на який розгорнута БСМ, при відсутності інформації про топологію мережі та стан вузлів. В цьому випадку маршрут польоту будується з метою покриття всієї території спостереження (рис. 1.10).

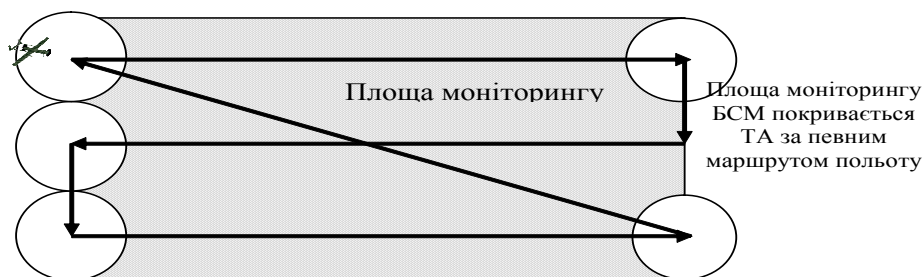


Рисунок 1.10 – Варіант маршруту об'їзду площі моніторингу

В процесі об'єкту ТА збирає як інформацію моніторингу, так інформацію про стан мережі (стан вузлів, підмереж, кластерів) для подальшого планування ЦУМ завдань управління.

Для скорочення часу обльоту (відповідно часу збору даних моніторингу) доцільно групувати вузли в певні кластери, визначати точки збору даних в кластерах та здійснювати обліт тільки визначених точок (рис. 1.11).

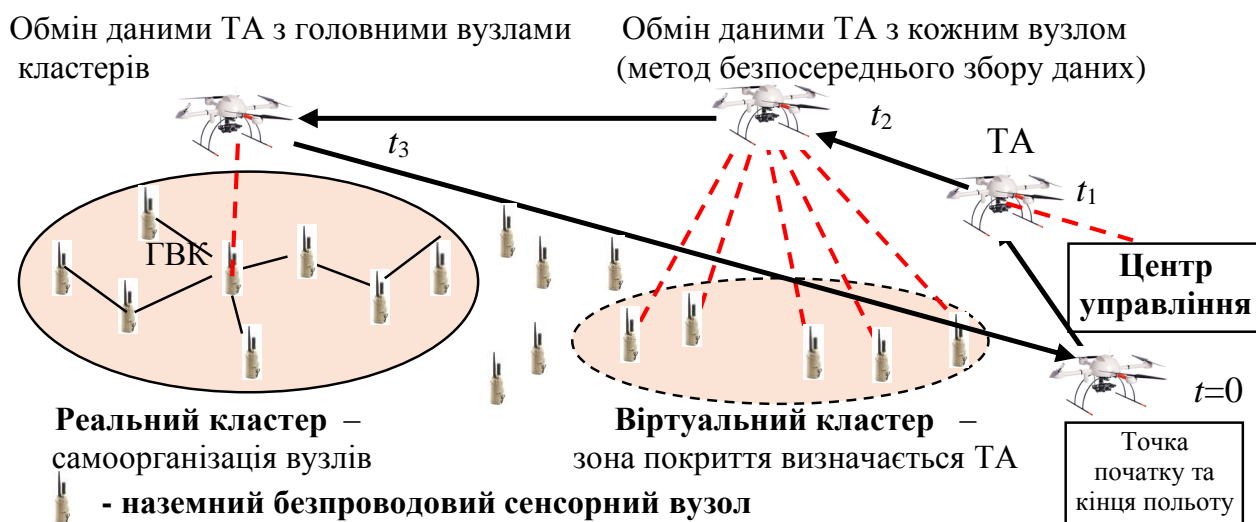


Рисунок 1.11 – Ілюстрація методів збору даних з вузлів ТА

В роботах [7, 11, 15] запропоновано знаходити „центри мас” кластерів та здійснювати обліт ТА тільки через центр цих кластерів, що значно скорочує час обльоту, однак ці методи не враховують можливість мінімізації кількості кластерів за рахунок адаптації до радіуса покриття (висоти польоту) ТА, стан енергії вузлів та не впливають на час функціонування БСМ. Тому потребують свого вдосконалення.

2. Збір ТА інформації моніторингу з головних вузлів (рис. 1.12) кластерів мережі [2, 11 – 15, 22] .

При цьому методі мережа за рахунок самоорганізації розбивається на кластери з виділенням за певним алгоритмом головних вузлів кластерів (ГВК). У кластерах будуються топологія та маршрути передачі даних від простих вузлів-моніторингу до головних вузлів, які збирають і зберігають дані моніторингу свого кластера мережі до підльоту ТА. Далі центр управління мережею (або СУ ТА) будує маршрут обльоту і збору даних тільки з головних вузлів кластерів.

Переваги: зменшення часу польоту (скорочення часу збору інформації моніторингу) в порівнянні з першим методом, потрібна менша кількість ТА. Недоліки – необхідність застосовування множини алгоритмів управління мережею, реалізація яких потребує додаткового службового трафіка та відповідного спеціального програмного забезпечення в системі управління вузла мережі.

До переліку алгоритмів управління БСМ належать:

поділ мережі на кластери (повинна бути проведена оптимізація кількості та розмірів кластерів в залежності від різних цільових функцій, наприклад, мінімізувати витрату енергії вузлів в процесі передачі від вузлів-моніторингу до головного вузла, забезпечити час доставки від вузла-моніторингу до головного вузла тощо);

вибір головних вузлів в кластерах за певними параметрами в залежності від цільових функцій управління мережею і ситуації на мережі;

побудова енергоефективної топології в кластерах;

організація процесу маршрутизації даних моніторингу від всіх звичайних вузлів до головних вузлів (необхідно визначити спосіб і метрики побудови та підтримки маршрутів передачі);

побудова, оптимізація та корегування маршруту обльоту ТА головних вузлів тощо.

Завданням збору даних з сенсорних мереж присвячена значна кількість робіт зарубіжних (R. Zhang, H. Okcu, D.-T. Ho, E.I. Grotli, M. Soyuturk, Кучерявий А.Е., Киричек Р.В. тощо) та вітчизняних (Лисенко О.І., Валуйський С.В. тощо) вчених [2, 5 – 17]. За результатами аналітичного огляду встановлено, що більшість запропонованих на сьогодні методів збору даних вирішують лише часткові завдання збору даних, не враховують особливості функціонування конкретних мереж, багатокритеріальний характер цільових функцій управління мережею та потребують вдосконалення. Існуючі методи збору даних з наземних безпроводових сенсорних мереж не завжди прийнятні (в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування, наявності н зв'язних підмереж), а також неефективні, оскільки призводять до значної витрати енергії батарей вузлів та відповідно малого часу функціонування мережі. Методи збору даних з використанням ТА знаходяться на початковому рівні створення, не враховують наявні ресурси мережі, не вирішують завдання багатоцільового управління (оптимум часу збору даних моніторингу, часу функціонування БСМ, кількості ТА), не завжди дозволяють відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу, не проводять оптимізацію кількості кластерів, не оптимізують топологію в кластерах і маршрути передачі даних та потребують свого вдосконалення.

1.3.2 Траєкторія польоту телекомунікаційних аероплатформ

ТА збирає інформацію з сенсорних вузлів за певним маршрутом польоту. Скорочення маршруту польоту призводить до зменшення часу збору інформації і зменшення витрати енергії ТА, але збільшує витрату енергії вузлів через збільшення відстані в радіоканалі вузол-ТА. У роботах [2, 7, 60, 61] ця задача розглядається як задача комівояжера – знайти найкоротший маршрут переміщення

ТА при відвідуванні визначеної множини сенсорних вузлів, що забезпечують обмін інформацією з ТА. Відомі різні алгоритми і методи вирішення цієї задачі: повного перебору, лінійного цілочисельного програмування, гілок і меж, жадібні евристичні, генетичні та ін.

У статтях [7, 14] порівнювалися алгоритми пошуку найкоротшого шляху Дейкстри, Белмана-Форда, Флойда-Уоршелла, AStar з позицій обчислювальної складності. Завдання відноситься до класу NP-повних. Число ітерацій алгоритму значно збільшується при збільшенні розмірності мережі. Отримання точного рішення для мережі значної складності проблематично. Тому на практиці застосовують методи отримання приблизного рішення. Серед вищеописаних жадібних алгоритмів [7] за якістю оптимальності рішення найкращим є метод найдешевшого включення, однак він вимагає максимальної обчислювальної трудомісткості. Найменш трудомістким з жадібних алгоритмів є метод найближчого сусіда. Метод полягає в наступному: вузли послідовно включаються в маршрут, причому кожен черговий вузол, який включається в маршрут, повинен бути найближчим до останнього вибраного вузла серед всіх інших, ще не включених до складу маршруту. Метод найближчого сусіда в подальшому будемо використовувати для побудови базового маршруту обльоту.

Однак крім обчислення маршруту польоту ТА важливе значення має висота польоту (положення) ТА, яка визначає розмір площі покриття, відстань між вузлом і ТА. Збільшення висоти призводить до збільшення витрати палива (енергії) у ТА, витрат енергії вузлів на процес передачі через збільшення відстані, та зменшення площі покриття, числа вузлів, здатних передати дані моніторингу. І навпаки. Тому висота польоту повинна бути оптимізована з урахуванням цільових функцій управління мережею і обмежень на її ресурси, директивних вимог [8]. Крім цього, наземні вузли можуть знаходитися в зоні радіозв'язку з ТА при його русі лише обмежений час. Тому за цей час необхідно встигнути передати дані моніторингу певного обсягу до ТА від множини вузлів, що знаходяться в зоні радіозв'язку ТА. Значення часу обміну залежить від швидкості передачі, кількості джерел інформації і прийнятого протоколу каналного рівня.

Багато досліджень було присвячено критеріям вибору вузлів для забезпечення обміну з ТА, спрямованим на поліпшення ефективності процесу обміну [6 – 18]. Наприклад, знайти найближчі вузли для скорочення маршруту переміщення ТА; встановити зв'язок на мінімальній відстані з вузлами, що мають мінімальну енергію батарей; вибрати вузли, що знаходяться в „центрі маси” кластера та ін.

Таким чином, існуючі на сьогодні методи збору даних моніторингу в БСМ при побудові маршрутів польоту не враховують обмеження на наявні ресурси мережі, наявність декількох цільових функцій управління тощо.

Отже виникає актуальна наукова задача – вдосконалення методів збору інформації моніторингу з вузлів БСМ за допомогою ТА, які будуть спроможні реалізовувати певні цільові функції управління мережею.

1.4 Загальна постановка задачі дослідження

Модель мережі. Розглядаємо неоднорідну БСМ. Наземні сенсорні вузли випадковим чином розподілені на певній території, мають однакові функції та ресурси, стаціонарні, не обслуговуються, не змінюють свого місця розташування, оснащені системою позиціонування (наприклад, GPS). ТА і сенсорні вузли оснащені однаковим обладнанням і підтримують одні і тіж протоколи інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11 [62]), мають власні системи управління та кооперативно діють між собою. Кожен сенсорний вузол мережі може реалізовувати певний клас методів збору (безпосередній або з головних вузлів).

Кожен вузол, включаючи головні вузли, має достатній обсяг пам'яті для зберігання даних моніторингу. Коли в зону радіозв'язку вузла (метод безпосереднього збору) або головного вузла кластера (метод збору з ГВК) входить ТА, він (відповідно до визначеної моделі обміну) відправляє їй зібрані дані моніторингу (вузлів свого кластера). При реальній кластеризації мережі (метод збору з ГВК) кожен вузол буде мати можливість виконувати одну з трьох функцій: вузла моніторингу, вузла маршрутизатора та головного вузла кластера.

ТА має можливість переміщуватися в трьох вимірах із змінною швидкістю на обмеженій висоті та обмежений час. Кожна ТА обладнана безпроводовою точкою доступу (маршрутизатором) на борту, має можливість приймати, обробляти дані вузлів та передавати їх (після обльоту або через мережу ТА) на базову станцію для подальшої обробки. ТА має власну систему управління, що дозволяє самостійно приймати рішення в умовах відсутності зв'язності з центром управління мережею.

Основними етапами синтезу методу збору даних моніторингу з вузлів мережі з використанням ТА є [37]: аналіз вихідних даних, існуючих методів збору, вимог до процесу збору; визначення способу управління та цільових функцій управління; визначення класу методів збору даних, розробка основних етапів їх функціонування, алгоритмів (моделей) обміну між вузлами і ТА; розробка моделей побудови траєкторії польоту ТА; визначення моделей польоту (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Складові синтезу методів збору даних з вузлів ТА

Розглянемо більш детально кожен з етапів.

1. Аналіз вихідних даних, існуючих методів збору даних з використанням ТА, вимог до збору даних. Аналізуються такі вихідні дані: характеристики мережі, характеристики вузлів мережі, характеристики ТА, вимоги до якості збору даних, вимоги до системи збору даних моніторингу, вартісні показники.

БСМ визначається за наступними характеристиками:

територія моніторингу, кількість сенсорних вузлів, розміщених на ній;
тип об'єктів (середовища) моніторингу, необхідні параметри збору даних про ці об'єкти або середовища;

тип системи збору даних (реального часу або з затримкою в отриманні);
спосіб збору даних моніторингу вузлами (за подіями, періодично, постійно);
спосіб збору даних ТА – з кожного вузла (обліт кожного вузла, обліт всієї території моніторингу, обліт певних точок збору) або призначених головних вузлів мережі при її кластеризації;

спосіб установа (доставки) сенсорних вузлів – детермінований (є можливість встановити вузли в заздалегідь в визначені місця), випадковий (розкидання з повітря, доставка снарядами, ракетами тощо);

вимоги до цільових функцій управління.

Кожен вузол мережі характеризується наступною множиною характеристик:
кількість сенсорних модулів, які здійснюють моніторинг;
режими роботи (активний – моніторинг, передача / прийом даних; пасивний – сон);

інтенсивність надходження даних моніторингу та їх обсяг;
дальність і модель покриття кожного сенсорного модуля;
початкова енергія батареї вузла і рівень витрат її енергії в основних режимах роботи;

потужність передавача, чутливість приймача, прийнятий протокол інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11, ZigBee і ін.), які визначають швидкість і дальність передачі в радіоканалі, витрати енергії на біт інформації;

продуктивність процесора, обсяг пам'яті, вартість;
прийняті протоколи обміну на різних рівнях моделі OSI;
можливості системи управління (прийняті методи та алгоритми обміну даними моніторингу).

Кожна телекомунікаційна аероплатформа визначається наступними характеристиками:

тип БпЛА – літаковий або роторний тип, спосіб і час запуску, посадки тощо;

вага, час, висота, швидкість польоту, вартість тощо;
 характеристики приймача, процесора, пам'яті, вартість тощо;
 прийняті протоколи обміну з вузлами на різних рівнях моделі OSI;
 можливості системи управління (методи і алгоритми збору даних моніторингу) тощо.

Центр управління збором даних визначається технічними характеристиками: запуску та управління польотом ТА, засобів радіозв'язку, апаратних обчислювальних засобів, спеціалізованого програмного забезпечення, що реалізує відповідний метод збору даних.

Задаються вимоги до якості збору даних в мережі ТА: обсяг зібраних даних, час їх збору, частка вузлів збору (з усіх вузлів мережі або її частини) та ін.

Також задаються необхідні вимоги до системи збору даних моніторингу: граничний час збору даних, мінімальний час функціонування мережі по здійсненню моніторингу (задана кількість раундів обльотів), гранична кількість ТА, вартість обладнання та експлуатації та ін.

Проводиться аналіз існуючих методів збору даних моніторингу ТА [2, 7 – 15] на відповідність заданим вимогам. І в разі їх невідповідності здійснюється розробка нових або вдосконалення існуючих методів збору даних.

2. Спосіб управління та цільові функції управління (рис. 1.13).

Для ефективного управління процесом збору даних необхідно створити відповідну систему управління (СУ). СУ являє собою ієрархію взаємодії: центр управління мережею, системи управління ТА, системи управління вузлів мережі.

Прийняття рішень з управління може здійснюватися централізовано (центром управління, ТА) або децентралізовано (вузлом мережі).

Синтез СУ являє собою складне завдання, тому краще його проводити за функціональними підсистемами. Пропонується в СУ виділити наступні основні функціональні підсистеми [26, 32, 37]: управління польотом, телекомунікаційна, збору даних моніторингу, збору даних про стан мережі, енергозбереження, прийняття рішень. Кожна з них вирішує свої завдання управління мережею.

Підсистема управління польотом забезпечує політ ТА за розрахованою траєкторією, з певною швидкістю і висотою.

Телекомунікаційна підсистема забезпечує обмін даними між вузлами і ТА або між вузлами мережі в межах дальності радіозв'язку.

Підсистема збору даних про стан мережі здійснює обмін службовими повідомленнями між ТА-вузол або вузол-вузол, які містять інформацію про стан вузлів мережі (координати, рівень енергії акумулятора, обсяг даних моніторингу, час активного і пасивного режимів і ін.).

Підсистема енергозбереження здійснює перехід в енергозберігаючі режими роботи вузлів і ТА.

Підсистема прийняття рішень координує роботу підсистем і здійснює пошук рішення по закладеним алгоритмам управління.

Підсистема збору даних повинна забезпечити збір даних моніторингу з сенсорних вузлів ТА при досягненні певних цільових функцій управління. Саме вона є предметом нашого розгляду.

Цільовими функціями управління всією мережею можуть бути [18, 20]:

а. Мінімізація (обмеження) часу збору $T_{зб}$ інформації моніторингу – за мінімальний (обмежений) час польоту (один раунд обльоту) зібрати дані моніторингу від всіх (виділених) сенсорних вузлів при обмеженні на кількість ТА $N_{ТА} \leq N_{ТАзад}$, заданий обсяг даних моніторингу $V_{дм} \geq V_{дмзад}$ і час функціонування мережі $T_{ф} \leq T_{фзад}$:

$$T_{зб} \rightarrow \min \text{ або} \quad (1.1)$$

$$T_{зб} \leq T_{збзад}. \quad (1.2)$$

Час збору даних залежить від характеристик ТА (тривалість, швидкість і висота польоту, параметри радіообладнання і ін.), довжини маршруту, висоти польоту тощо. Довжина маршруту залежить від кількості точок (вузлів) збору інформації (кількості кластерів), їх розміщення, способу вибору головних вузлів і стратегії обльоту кластера. Зі зменшенням висоти польоту ТА зменшується зона покриття та можливість встановлення радіозв'язку з меншою кількістю вузлів. Однак гранична дальність радіозв'язку обмежена малою потужністю передавачів

вузлів. При цьому швидкість передачі даних в радіоканалі залежить від відстані, прийнятого протоколу обміну. Час обміну ТА-вузол не повинен перевищувати часу радіозв'язності між вузлом і ТА при її прольоті.

Є певний оптимум кількості кластерів $n_{\text{кл}}$ (розмірність, діаметр), що визначає компроміс між часом обльоту ТА і часом функціонування мережі.

б. Максимізація (забезпечення) часу функціонування сенсорної мережі $T_{\text{ф}}$.

$$T_{\text{ф}} \rightarrow \max \text{ або} \quad (1.3)$$

$$T_{\text{ф}} \geq T_{\text{фзад}}, \quad (1.4)$$

$$T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}, V_{\text{дм}} \geq V_{\text{дмзад}}, N_{\text{ТА}} \leq N_{\text{ТАзад}},$$

при обмеженнях на задані: час $T_{\text{зб}}$, об'єм $V_{\text{дм}}$ збору даних моніторингу (ДМ) и кількість ТА ($N_{\text{ТА}}$).

Поняття „час функціонування” $T_{\text{ф}}$ може трактуватися різними способами і буде визначатися користувачем мережі [23]:

час роботи мережі до виходу з ладу першого вузла через витрату енергії його батареї (так званий період стабільної роботи мережі);

час роботи мережі до виходу з ладу k -критичних вузлів мережі, що визначають функціонал мережі;

час роботи мережі до виходу з ладу всіх або певного відсотка вузлів.

Вже згадана ціль може реалізовуватися різними способами (методами) за рахунок зменшення витрат (перерозподілу) енергії батарей вузлів на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем [36, 45]. Наприклад, за рахунок:

зменшення відстані між сенсорним вузлом і ТА (підліт ТА на найближчу відстань до вузла), регулювання рівня потужності передачі на мінімальному рівні (фізичний рівень). Однак в цьому випадку необхідне буде облітати значну частину вузлів, що призведе до значного збільшення довжини маршруту;

оптимізації кількості кластерів, числа вузлів в кластері, діаметра кластера (прикладний рівень);

періодичної ротації вузлів, які виступають в ролі головних вузлів (прикладний рівень);

оптимізації процесу вибору головних вузлів в кластері;

вибору стратегії обльоту кластера: найближчий вузол до маршруту переміщення ТА; вузол, що знаходяться в „центрі маси” кластера тощо;

застосування ефективних МАС-протоколів. Наприклад, як варіант, може бути здійснена оптимізація по застосуванню МАС-протоколу – на початковому етапі взаємодії ТА-кластер використовується випадковий протокол каналного рівня, а при обміні даними з конкретними вузлами в кластері – детермінований;

побудови енергоефективної топології всередині кластерів (регулювання потужності передачі і взаємного розташування вузлів);

балансування трафіку в кластерах мережі, наприклад, за рахунок застосування багатошляхової маршрутизації [4];

застосування енергоефективних маршрутів передачі в кластерах, тобто методів маршрутизації, що дозволяють перерозподіляти трафік в залежності від наявності енергії батарей вузлів в маршрутах передачі між вузлами кластера і його головним вузлом (мережевий рівень);

мінімізації обсягу службового трафіку (мережевий, прикладний рівень OSI) і ін.

в. Мінімізація кількості ТА, необхідних для збору даних із заданою якістю

$$N_{\text{ТА}} \rightarrow \min, \quad (1.5)$$

При обмеженнях на час збору інформації $T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}$, об’єм даних моніторингу $V_{\text{дм}} \geq V_{\text{дмзад}}$ та час функціонування мережі $T_{\text{ф}} \leq T_{\text{фзад}}$.

Досягається поділом БСМ на підмережі і оптимізацією процесу збору даних в кожній підмережі.

Наявність декількох цільових функцій управління призводить до завдань багатокритеріальної оптимізації. У загальному випадку її рішення буде залежати від вимог що пред’являються до системи управління мережею. У конкретному випадку завдання багатокритеріальної оптимізації може бути вирішене методами: головного показника, лексикографічного, адитивної або мультиплікативної згортки, поступок і ін.

3. Вибір способу збору даних моніторингу ТА (рис. 1.13).

Залежно від організації мережі (некластеризована або кластеризована) існують два основних методи збору даних моніторингу ТА з сенсорних вузлів: безпосередній збір з кожного вузла мережі та збір даних з головних вузлів кластерів мережі (рис. 1.11) [2, 18 – 22]. Кожен з них передбачає свої завдання управління, має свої переваги і недоліки (детально розглянуто в п. 1.3.1).

4. Алгоритми (моделі) обміну між ТА і вузлами мережі.

Існуючі протоколи (алгоритми) обміну каналного рівня не враховують специфіку обміну з ТА: обмеженість часу зв'язності через переміщення, можливість зміни положення ТА в просторі відносно вузлів кластера тощо.

Тому необхідно розробляти нові або модифікувати існуючі моделі (алгоритми) обміну даними з врахуванням переміщення (положення) ТА у просторі.

5. Побудова траєкторії обльоту точок збору даних.

У роботах [7, 60, 61] завдання пошуку маршруту польоту розглядається як задача комівояжера, яка відноситься до класу NP-повних. Відомо безліч алгоритмів (методів) її рішення: повного перебору, лінійного цілочисельного програмування, гілок і меж, жадібні евристичні, генетичні та ін. Вибір конкретного алгоритму пошуку маршруту буде визначатися розмірністю БСМ і обчислювальними обмеженнями ЦУМ (СУ ТА).

В роботі пропонується розрахунок траєкторії польоту ТА здійснювати в два етапи. На першому етапі центр управління розраховує базову траєкторію обльоту між центрами (головними вузлами) кластерів на одній висоті (фактично завдання пошуку найкоротшого маршруту). На другому етапі проводиться коригування базової траєкторії польоту в кластерах з урахуванням прийнятих правил по вибору точок обміну даними для досягнення певних цільових функцій управління мережею.

6. Модель польоту ТА.

Основними моделями польоту є:

політ з однаковою постійною швидкістю в кластері та між кластерами;

політ ТА з однаковою постійною швидкістю достатньою для обслуговування вузлів кластера і з підвищеною швидкістю між кластерами;

політ з адаптивною швидкістю в кластерах;

політ з гарантованим обслуговуванням всіх вузлів кластера.

Вибір моделі польоту буде визначатися цільовими функціями управління.

Способи підвищення ефективності процесу збору даних ТА з вузлів БСМ за цільовими функціями управління та за різними етапами функціонування БСМ наведені на рис. 1.13 [36]. Вони будуть використані в процесі вдосконалення методів збору даних з БСМ ТА (в розділах 2 – 4).

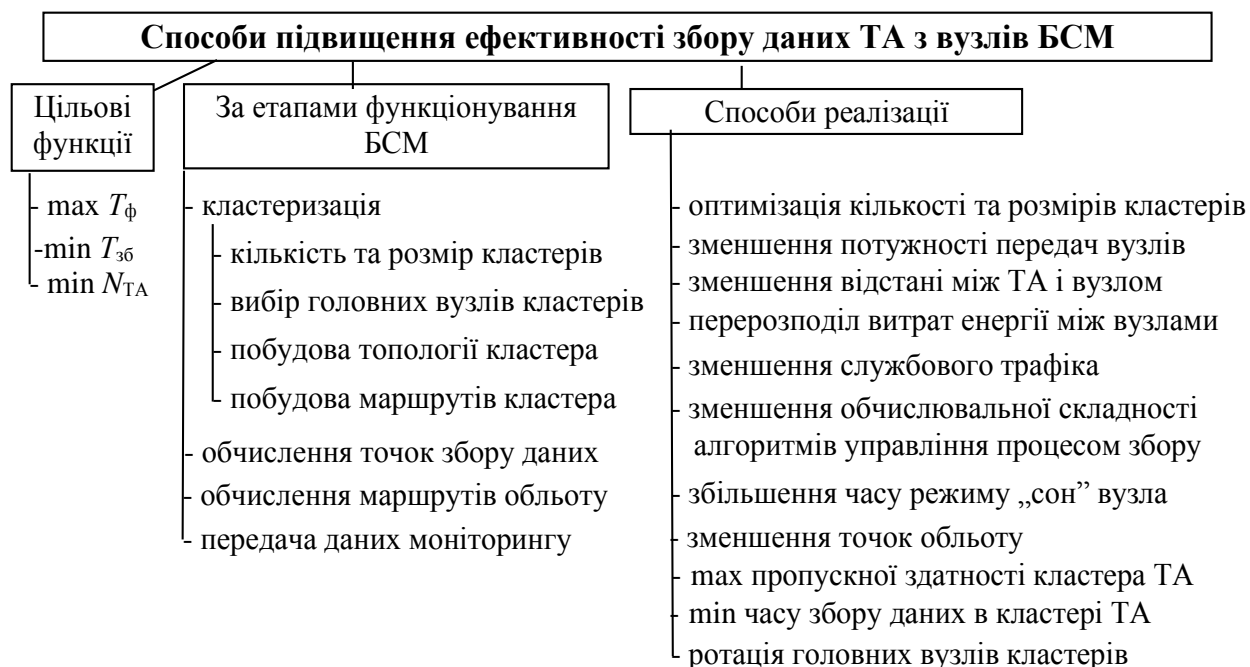


Рисунок 1.13 – Способи підвищення ефективності збору даних ТА з вузлів БСМ

Таким чином, для заданої БСМ необхідно синтезувати методи збору даних моніторингу з використанням ТА, які б забезпечили реалізацію заданих цільових функцій управління.

Схема розв’язання даної задачі з визначенням часткових задач по розділах роботи показано на рис. 1.14.

На основі аналізу особливостей функціонування БСМ з використанням ТА для збору даних моніторингу (аналіз характеристик вузлів БСМ, самої мережі,

характеристик ТА, вимог до параметрів процесу збору даних, визначених цільових функцій управління процесом збору), аналізу існуючих методів збору здійснюється синтез вдосконалених методів (методу безпосереднього збору даних з вузлів БСМ з їх кластеризацією ТА, метод збору даних ТА з головних вузлів кластеризованих БСМ), які використовують вдосконалену траєкторно-позиційну модель обміну даними між ТА і вузлами кластера.

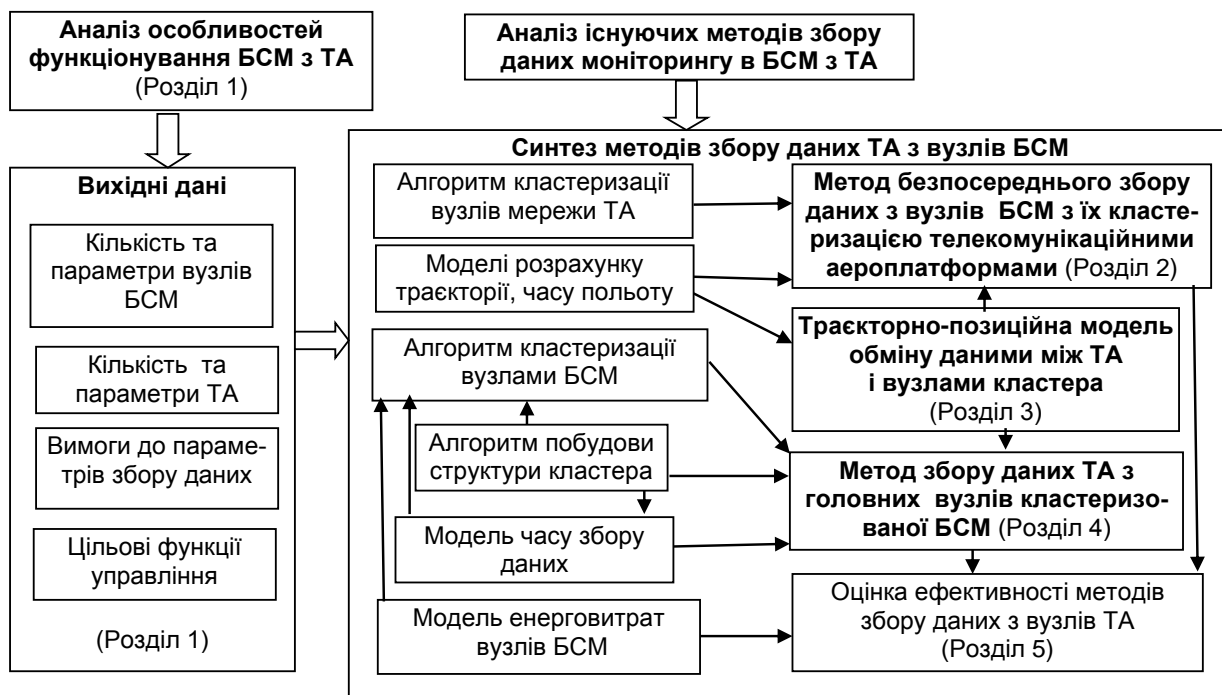


Рисунок 1.14 – Схема розв'язання поставленої наукової задачі

Висновки до 1 розділу

1. В теперішній час в різних сферах людської діяльності вже застосовуються безпроводові сенсорні мережі, які призначені для збору фізичних параметрів зовнішнього середовища або об'єктів: промисловості, сільського господарства, охорони кордонів, надзвичайних ситуацій тощо.

Характерними особливостями БСМ є: значна розмірність (сотні, тисячі вузлів), обмеженість ресурсів вузлів (енергії батареї, продуктивності процесора, пам'яті, потужності передавача, пропускної спроможності радіоканалу) тощо. Мережа може бути використовуватися для роботи протягом декількох місяців або

навіть років в важкодоступних районах. При цьому заміна батарей для вузлів мережі може бути непрактичною або навіть не можливою. Збір інформації моніторингу в БСМ класичними методами призводить до значних витрат енергії вузлів та зменшення часу функціонування мережі.

Застосування ТА для збору даних моніторингу має явні переваги над іншими способами: незначний час збору даних, не потребує спеціальних маршрутів переміщення (в порівнянні з застосуванням мобільних наземних роботів), має більшу зону покриття, наявність прямої видимості в каналах радіозв'язку тощо. Крім цього застосування ТА дає можливість забезпечити збір даних в умовах відсутності будь-якої телекомунікаційної інфраструктури загального користування та наявності незв'язних підмереж.

2. Аналіз функціонування БСМ з використанням ТА показав, що вони відносяться до класу складних, багаторівневих, багатofункціональних, динамічних систем та мають ряд проблемних завдань, пов'язаних зі збором даних моніторингу: побудова точок збору даних, побудова траєкторії польоту ТА, забезпечення якості обслуговування сенсорних вузлів, підвищення часу функціонування мереж, мінімізація витрат ресурсів тощо. Ефективне функціонування таких складних мереж не можливе без відповідної системи управління, складовою частиною якої є підсистема управління збором даних з вузлів БСМ з використанням мережі ТА. Управління споживанням енергії сенсорними вузлами (зменшення, перерозподіл витрат між вузлами) в процесі збору даних моніторингу з ТА має вирішальне значення для збільшення часу їх функціонування.

3. Запропоновані на сьогодні методи і алгоритми збору даних ТА вирішують лише часткові завдання збору даних, не враховують особливості функціонування конкретних безпроводових сенсорних мереж, багатокритеріальний характер цільових функцій управління мережею та потребують удосконалення. Існуючі методи планування наземних безпроводових сенсорних мереж також не ефективні, оскільки потребують значних витрат енергії вузлів, мають велику складність та час обчислення, що не дозволяє відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу.

4. При зборі даних моніторингу з використанням ТА необхідно вирішувати ряд оптимізаційних задач: мінімізувати час збору даних, підвищити час функціонування мережі, мінімізувати витрати ресурсів тощо.

5. Вдосконалення методів та алгоритмів збору даних моніторингу є актуальною задачею на сучасному етапі розвитку безпроводових сенсорних мереж з ТА і має не тільки теоретичне, а й прикладне значення для забезпечення ефективного функціонування сучасних БСМ різного призначення.

Запропонована послідовність та основні етапи синтезу методів збору даних з використанням ТА: аналіз вихідних даних, визначення способу управління і цільових функцій управління; визначення класу методів збору даних, розробка основних етапів їх функціонування, алгоритмів (моделей) обміну між вузлами і ТА; розробка моделей побудови траєкторії польоту ТА; визначення моделей польоту.

Основні результати розділу опубліковано автором у наукових працях: [20, 21, 26 – 28, 31, 33, 34, 36 – 38, 40, 45, 47 – 51, 58, 59].

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ЗБОРУ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ З ВУЗЛІВ БЕЗПРОВОДОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ З ЇХ КЛАСТЕРИЗАЦІЄЮ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

Розглядається метод безпосереднього збору даних з сенсорних вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами, який в базовому виконанні потребує обльоту телекомунікаційною аероплатформою кожного наземного вузла або обльоту всієї території розміщення вузлів [2, 7]. Основна перевага цього способу – відсутність додаткових алгоритмів управління процесом обміну даними з ТА в сенсорних вузлах, що призводить до значного спрощення вимог до системи управління вузлом та здешевлення в цілому обладнання вузлів; основні недоліки – значний часу збору даних та підвищення вимог до технічних характеристик ТА.

Для усунення цих недоліків пропонується об'єднувати вузли в тимчасові кластери за допомогою ТА, тобто пропонується роль головного вузла кластера покласти на ТА [7 – 9]. Центр управління мережею (або безпосередньо СУ ТА в умовах автономного польоту), який володіє інформацією про координати положення вузлів, здійснює розрахунки точок збору даних (визначає положення ТА у просторі), наприклад, як „центр маси” віртуального кластера. На відміну від існуючих центроїдних алгоритмів кластеризації як основу алгоритму тимчасової кластеризації БСМ пропонується використовувати алгоритми кластерного аналізу *k*-середніх та FOREL [7, 18], які характеризуються меншою обчислювальною складністю та можливістю адаптувати розміри кластера (зменшити кількість кластерів).

Після визначення точок збору даних ЦУ (ТА) проводиться розрахунок так званої базової траєкторії польоту ТА (маршрут та висота) між ними. Далі ТА здійснює політ через визначені точки збору та обмін даними з вузлами кластера.

Запропоновані: модифікація алгоритмів FOREL та k -середніх з врахуванням завдання збору даних, нові моделі та правила корегування базової траєкторії польоту в кластері для реалізації цільових функцій управління мережею [18, 43].

2.1. Постановка завдання та напрями рішення

Дано: характеристики мережі, характеристики вузлів мережі, характеристики ТА, вимоги до якості збору даних, вимоги до системи збору даних моніторингу відповідно до п. 1.4.

Необхідно: визначити кількість та координати точок збору даних, порядок збору даних моніторингу з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами та траєкторію їх переміщення (позиціонування), для виконання певних цільових функцій управління: мінімізація або обмеження часу збору даних (2.1), максимізація часу функціонування БСМ або перевищення визначеного часу (2.2), мінімізація кількості ТА (2.3) або використання певної кількості ТА [18, 20, 37]:

$$T_{зб} \rightarrow \min \text{ або } T_{зб} \leq T_{збзад}, \quad (2.1)$$

$$T_{\phi} \rightarrow \min \text{ або } T_{\phi} \geq T_{\phiзад}, \quad (2.2)$$

$$N_{ТА} \rightarrow \min \text{ або } N_{ТА} \leq N_{ТАзад}, \quad (2.3)$$

$$T_{зб} = L_{мб} / v; L_{мр} = f(n_{кл}, (x, y)_k, h, t_{обк}, St), k = 1 \dots n_k, \quad (2.5)$$

$$\text{при обмеженнях } \Omega \text{ на:} \quad (2.6)$$

граничний час (відстань) в раунді польоту ТА –

$$T_{зб} \leq T_{полmax} \quad (0 < L_{мб} \leq L_{мр} \leq L_{мmax});$$

швидкість польоту ТА – $v = [v_{\min}, v_{\max}]$; кількість кластерів – $1 \leq k \leq n_k$;

енергію батарей вузлів і ТА – $e_i \leq e_{\max}$, $e_{ТА} \leq e_{ТАmax}$;

координати розташування (x, y) вузлів знаходяться в області покриття зони моніторингу А; висоту польоту – $h = [h_{\min}, h_{\max}]$, обсяги буферів $V_{буфвузи} \leq V_{буфвузмах}$; $V_{буфТА} \leq V_{буфТАmax}$;

вимоги моделей обслуговування, наприклад, при гарантованій якості обслуговування час обльоту кожного k -го кластера $t_{обклk}$ повинен бути більшим ніж сумарний час передачі між всіма вузлами і ТА – $t_{обклk} \geq t_{перk}$;

St – множину стратегій (правил) обльоту.

При синтезі методів збору інформації ТА безпосередньо з вузлів БСМ необхідно вирішити ряд основних завдань (рис. 2.1) [18, 20, 21, 37]:

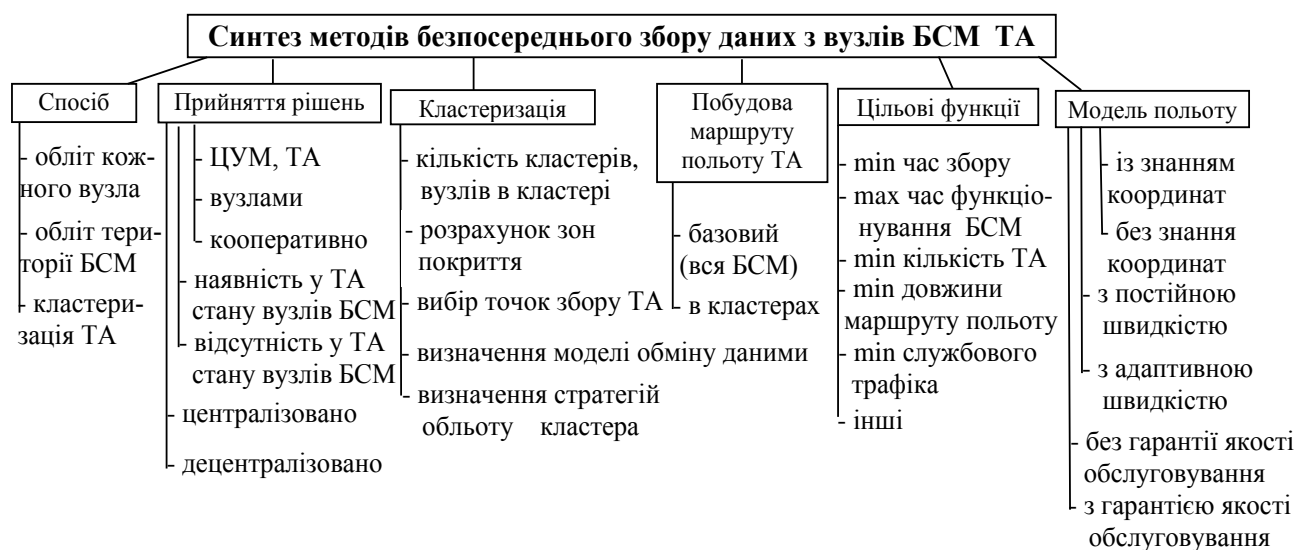


Рисунок 2.1 – Завдання синтезу методів безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами

1. Визначити спосіб безпосереднього збору даних з кожного вузла мережі – з обльотом кожного вузла, з обльотом території (де розташована БСМ), з обльотом кластерів БСМ.

2. Визначити спосіб прийняття рішень по управлінню – ізолювано (центр управління мережею, СУ ТА, СУ вузла БСМ) або кооперовано – у взаємодії між ними; при наявності або відсутності інформації про стан вузлів БСМ у ТА (ЦУМ); централізовано або децентралізовано.

3. Порядок та правила кластеризації БСМ:

а) розрахувати кількість і розміри кластерів (повинна бути проведена оптимізація кількості та розмірів кластерів в залежності від різних цільових функцій управління мережею на етапі збору даних);

б) провести кластеризацію мережі і визначити точки збору даних моніторингу за певними параметрами в залежності від цільових функцій управління мережею і ситуації в мережі;

в) визначити моделі (алгоритми) обміну даними між ТА і вузлами кластера;

г) розрахувати стратегії та параметри обльоту ТА вузлів в кластерах по заданим цільовим функціям (побудова, оптимізація та корегування шляху обльоту ТА вузлів в залежності від цільових функцій управління та наявних ресурсів ТА і вузлів БСМ).

При наявності інформації про стан БСМ ці завдання вирішуються централізовано центром управління мережею (ЦУМ). При її відсутності – децентралізовано: ТА і вузлами мережі у взаємодії.

4. Побудувати маршрути обльоту точок збору даних ТА: базового (обльоту всієї мережі БСМ) та маршрутів обльоту кожного з кластерів. Наприклад, базові параметри польоту розраховує ЦУМ, а ТА здійснює коригування базового маршруту в кластерах після отримання інформації про стан вузлів кластера при підльоті до нього та наявності відповідних ресурсів.

5. Визначити цільові функції та їх пріоритет при управлінні процесом збору даних, а саме: мінімізація часу збору даних, максимум часу функціонування БСМ, мінімум ТА, мінімізація витрат енергії вузлів в процесі передачі від вузлів до ТА, тощо.

6. Визначити модель польоту на основі наявності або відсутності інформації про координати знаходження вузлів БСМ, з постійною або адаптивною швидкістю, з гарантією обслуговування або її відсутністю.

2.2 Моделі польоту ТА при зборі даних моніторингу з БСМ

Формування та реалізація параметрів польоту ТА відбувається в два етапи.

На першому – центр управління мережею будує базовий найкоротший маршрут з обльоту точок збору даних в БСМ одним з відомих алгоритмів вирішення задачі комівояжера [7, 60, 61], (наприклад, метод найближчого сусіда) визначає середню швидкість і висоту польоту.

На другому – при підльоті до чергового кластера ТА коригує параметри свого обльоту (траєкторію, швидкість, якість обслуговування) в залежності від кількості вузлів в кластері, параметрів вузлів кластера (місцеположення, наявна

енергія батарей вузлів та обсяги даних моніторингу), наявних особистих ресурсів (енергії та часу, що залишився на політ) і цільових функцій управління мережею. Так, наприклад, при існуванні „критичних” вузлів в кластері („виснажених”, „перевантажених” тощо) їх обліт (обслуговування) пропонується здійснювати на мінімальній відстані до них з пріоритетом в обслуговуванні. Для забезпечення гарантії часу збору даних розраховується та реалізується необхідна швидкість польоту (зависання ТА в певній точці простору на потрібний час).

Середній час польоту (в цілому зборі даних) в мережі $T_{зб}$ визначається співвідношенням довжини маршруту обльоту L_m до середньої швидкості польоту v : $T_{зб} = L_m/v$. Максимальний час обльоту визначає найпростіша стратегія збору даних ТА – безпосередньо з кожного вузла – $T_{збmax} = L_{mmax}/v$, мінімальний час (при даному рішенні по кластеризації) дорівнює $T_{збmin} = L_{mmin}/v$, де L_{mmin} – мінімальна довжина маршруту, що охоплює всі точки збору мережі за умови, що час, необхідний для збору (передачі) даних в кожному k -му кластері, буде менше часу його обльоту $t_{перk} \leq t_{обk}$ (при гарантованому обслуговуванні всіх даних моніторингу).

Скорочення довжини маршруту польоту призводить до зменшення часу збору інформації і зменшення витрати енергії ТА, але збільшує витрати енергії сенсорних вузлів через збільшення відстані в радіоканалах вузол-ТА.

Більш детально час збору даних $T_{зб}$ залежить від: вимог додатків, середньої швидкості польоту v , кількості сформованих кластерів мережі $n_{кл}$, розташування $(x, y)_k$ точок збору даних, базової довжини маршруту $L_{мб}$ (реальна довжина маршруту $L_{мр}$ буде збільшуватимуся через застосування різних стратегій обльоту кластерів), висоти польоту h , часу обльоту кожного k -го кластера мережі $t_{обклk}$, швидкості передачі в радіоканалі вузол-ТА, стратегії обльоту при обслуговуванні кожного k -кластера St_k , можливостей та ресурсу ТА.

При цьому доцільно розглядати різні моделі польоту.

1. Базова найпростіша модель.

Політ з однаковою постійною швидкістю в кластері та між кластерами. Спрощує управління переміщенням ТА, не висуває додаткових вимог до БПЛА,

може використовуватися як роторний так й літаковий тип БпЛА. Збір даних починається при встановленні радіозв'язку з першим вузлом кластера. Час збору дорівнює часу польоту через кластер. Дані, які вузли не встигли передати, зберігаються в вузлах до наступного раунду польоту. При прильоті до зони радіозв'язності з базовою станцією ТА передає їй дані та починає новий цикл обльоту. Модель може бути реалізована як роторним так і літаковим типом БпЛА.

2. Політ ТА з однаковою постійною швидкістю достатньою для обслуговування кластера та з підвищеною швидкістю (визначається можливостями БпЛА) при переміщенні між кластерами.

Для реалізації моделі необхідні БпЛА зі змінною швидкістю польоту. Ця модель може бути реалізована як роторним так і літаковим типом БпЛА.

3. Політ з адаптивною швидкістю в кластерах.

Для визначених типів додатків може бути необхідна різна швидкість обміну даними, яка визначається зовнішніми факторами такими як надзвичайна ситуація. Наприклад, деякі вузли можуть мати спеціальні можливості збору та передачі аудіо та відео даних, які можуть бути потрібними в певні моменти часу (поява порушника в зоні контролю, висока температура, тиск та вібрація в трубопроводі тощо). Крім цього для гарантованого збору даних необхідно адаптувати швидкість передачі до необхідного часу передачі даних.

Рішення про збільшення або зменшення часу збору інформації приймається ЦУМ або СУ ТА разом з вузлом-джерелом цих даних. Можуть бути використані БпЛА роторного та літакового типу.

4. Політ з гарантованим обслуговуванням вузлів кластера.

ТА розраховує час обслуговування всіх вузлів при постійній швидкості передачі. При браку часу вираховується додатковий час. Необхідно відмітити, що ця модель може бути використана в сценаріях надзвичайних ситуацій або спеціальних місіях, де моніторинг певного географічного району або „гарячої точки ” вимагається за певний період часу.

Модель може бути використана для передачі трафіку реального часу. Використовуються БпЛА роторного типу.

5. Політ з обмеженням максимального часу обслуговування кластера (вузла).

Вузол певного кластера в змозі зібрати досить великий обсяг даних, що вимагає дуже значного часу його обслуговування. Одночасно час інші вузли теж очікують обслуговування в цьому циклі польоту, час затримки в обслуговуванні певних додатків може бути перевищений, буфери інших вузлів кластера можуть бути переповнені тощо. Тому для справедливого обслуговування встановлюється граничний час обслуговування для кожного кластера. Якщо кількість даних в кластері не може бути обслужена в період цього циклу обльоту, тоді не обслужена частина даних переноситься на наступний раунд польоту. Використовуються БпЛА роторного типу. Ця модель також може бути застосована для забезпечення безпеки системи збору даних в цілому. Вона запобігає захопленню ТА вузлом супротивника, який виставив вимогу безмежно великого буферу та організує атаку типу „вимога в обслуговуванні” (DoS-атака).

2.3 Розрахунок точок збору інформації моніторингу

Модель мережі [18, 20, 44, 57]. Розглядається неоднорідна БСМ. Наземні вузли випадковим чином розподілені на певній території, мають однакові функції та ресурси, стаціонарні, не обслуговуються, не змінюють свого місця розташування, оснащені системою позиціонування (наприклад, GPS).

ТА і сенсорні вузли оснащені однаковим радіообладнанням і підтримують однакові протоколи інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11), мають обмежені дальність радіозв'язку і швидкість обміну. Кожен вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з ТА (при необхідності з іншими вузлами мережі), має достатній об'єм пам'яті для зберігання даних моніторингу.

ТА має можливість переміщатися в трьох вимірах із постійною або змінною швидкістю на обмеженій висоті та обмежений час. ТА має власну систему управління, яка дозволяє самостійно приймати свої рішення в умовах відсутності зв'язності з центром управління мережею. Коли в зону радіозв'язку вузла входить ТА, він відправляє йому зібрані дані моніторингу згідно прийнятої моделі обміну.

Вважається, що ТА знає координати вузлів, які можуть бути отримані одним із таких способів:

1. На етапі розгортання наземних мереж при детермінованому розміщенні вузлів фіксуються координати кожного з вузлів при його розміщенні.

2. У разі випадкового розгортання вузлів мережі ТА здійснює первинний обліт території, що покривається наземними вузлами БСМ, і збирає дані про координати вузлів в припущенні наявності в вузлах системи позиціонування. В цьому випадку маршрут польоту будується з метою покриття всієї території спостереження. В процесі обльоту ТА збирає як інформацію моніторингу, так інформацію про стан вузлів і кластерів для подальшого планування завдань управління.

3. При наявності зв'язної топології вузлів БСМ з наземним шлюзом з'являється можливість збору центром управління інформації про стан і координати розташування сенсорних вузлів.

Будемо вважати, що зона радіозв'язку ТА з вузлами являє собою коло (кластер) радіуса R , а зчитування інформації з вузлів БСМ може проводитися в довільних точках кластера.

Необхідно: знайти мінімальну кількість точок збору інформації (центрів кластерів) з вузлів БСМ та координати цих точок у просторі.

Завдання полягає в покритті вихідної множини точок (вузлів) мережі мінімальною кількістю кіл радіуса R . Задано:

зона покриття A , множина сенсорів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n\}$, $i = 1 \dots n$ та їх координати на місцевості $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$;

h – висота польоту ТА;

d_{\max} – дальність радіозв'язку між сенсорним вузлом і ТА у припущенні граничної моделі радіоканалу;

R – радіус зони покриття ТА, $R = \sqrt{d_{\max}^2 - h^2}$;

множина ТА $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_K\}$, $k = 1 \dots K$, проекція їх положення на місцевості $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_K\}$.

Необхідно: знайти мінімальну кількість ТА (кластерів $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_J\}$, $j = \overline{1, J}$) і розташування їх у просторі (центрів зон покриття ТА з радіусом R), для покриття всіх вузлів мережі (рис. 2.2).

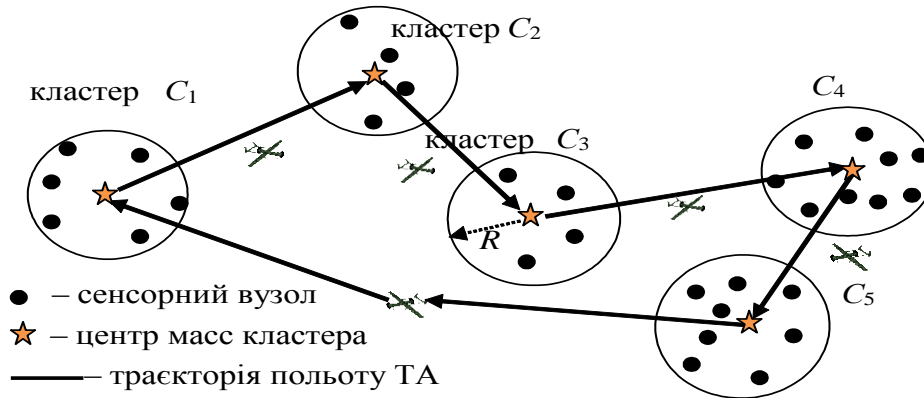


Рисунок 2.2 – Варіант кластеризації мережі та переміщення ТА між точками збору – „центрами мас” кластерів

Визначимо формальну постановки задачі.

Математична постановка задачі сформулюється в такий спосіб

$$\text{Min } K, \quad (2.7)$$

при виконанні обмежень

$$\min_{y_1, y_2, \dots, y_K} \max_j \min_{x \in C_j} |x - y_k| \leq d_{\max}, \quad k = \overline{1, K}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2.8)$$

$$q_j \leq q_{j\max}, \quad (2.9)$$

$$K \leq K_{\max}, \quad R = [R_{\min} \dots R_{\max}], \quad h = [h_{\min} \dots h_{\max}], \quad (2.10)$$

де $|x - y|$ – Евклідова відстань між крапками x та y на місцевості, q_j – кількість сенсорних вузлів в j -му кластері. Нерівність (2.8) – максимальна відстань між центром зони покриття та сенсорними вузлами повинна бути мінімізована; нерівність (2.9) визначає граничну кількість вузлів в кластерах; (2.10) – задає ресурсні обмеження.

Ця задача відноситься до класу обчислювальної геометрії та близька до задачі розміщення p -центрів – знаходження мінімальної кількості кіл фіксованого радіуса та їх положення, що покривають задану кількість точок [64]. Завдання є NP -повним, одержання точного рішення задачі для мереж великої розмірності є

складним, тому для її вирішення необхідно використовувати евристичні методи пошуку. Для отримання рішення пропонується використовувати ітераційні алгоритми кластерного аналізу FOREL та k -середніх [65, 66].

2.3.1 Алгоритм FOREL (FORmal ELement)

Алгоритм кластерного аналізу FOREL [7, 18, 65] вирішує завдання кластеризації за рахунок мінімізації сумарного квадратичного відхилення вузлів кластерів від центрів мас цих кластерів.

Функція, яка мінімізується, задається наступним чином:

$$M = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2, \quad (2.11)$$

де k – кількість кластерів; S_i – множина вузлів i -го кластера; μ_i – координати центру мас i -го кластера; x_j – координати j -го вузла, $(x_j - \mu_i)$ – відстань між вузлом кластера та центром мас цього кластера.

У двовірному просторі кожен вузол розглядається як точка на площині з координатами (x_j, y_j) . Координати центру мас i -го кластера визначаються згідно виразу 2.12:

$$x_i^{\mu} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_j, \quad y_i^{\mu} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_j. \quad (2.12)$$

Кожен вузол характеризується крім координат, ще й „масою” m_j , центр мас кластера визначається:

$$x_i^{\mu} = \frac{1}{m_i^{\Sigma}} \sum_{j=1}^{n_i} m_j x_j, \quad y_i^{\mu} = \frac{1}{m_i^{\Sigma}} \sum_{j=1}^{n_i} m_j y_j, \quad m_i^{\Sigma} = \sum_{j \in S_i} m_j. \quad (2.13)$$

В алгоритмі FOREL задається розмір кластера (в нашому завданні це розмір зони покриття R телекомунікаційною аероплатформою, який залежить від висоти польоту платформи h , максимальної дальності радіозв'язку між вузлом і ТА, кут спрямованості антени γ). Під R розуміється максимальна відстань від вузла кластера до його центру мас.

Алгоритм кластеризації FOREL включає в себе наступні кроки:

1. Задаються межі області, координати об'єктів (точок) $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ і максимальний розмір кластера ($R = f(h, d_{\max}, \gamma)$), номер кластера ($i = 1$).
2. Вибирається випадкова точка m_i в визначеній області. На початковому етапі ця точка приймається за центр мас кластера.
3. Всім вузлам, що знаходяться на відстані не більше R від точки m_i , присвоюється належність до цього кластера.
4. Для утвореного кластера обчислюється центр мас m_i' згідно виразів (2.12) або (2.13). Якщо отримані координати центру мас m_i' збігаються з координатами точки m_i , то вважається, що i -й кластер знайдено, всі вузли цього кластера позначаються номером кластера та не приймаються до подальшого розгляду. Далі перехід до кроку 5 – пошук наступного кластера. Якщо координати центру мас m_i' не збігаються з координатами точки m_i , то приймаємо $m_i = m_i'$, перехід до кроку 3.
5. Перевіряємо, чи залишилися вузли, які не належать до жодного кластера. Якщо таких вузлів немає (тобто всі кластери визначені), тоді перехід до кроку 6. Якщо вузли залишилися, то перехід до кроку 2 (пошук наступного кластера).
6. Вивід даних про належність вузлів до кластерів та координати центрів мас кластерів. Кінець алгоритму.

Примітка. Під час пошуку чергового кластера може виявитися, що на віддаленні менше значення R від обраного центру мас немає жодного вузла. В цьому випадку здійснюється випадковий вибір нового центру мас. Узагальнена схема-алгоритм функціонування FOREL приведена на рис. 2.3.

Слід зазначити, що задача кластеризації в двовимірному просторі може бути вирішена і в тривимірному просторі, в разі, коли вузли мережі розташовані не на плоскій поверхні, а на реальній місцевості.

В результаті роботи алгоритму БСМ при визначеному значенні R буде поділена на певну кількість кластерів. Збільшуючи значення R і виконуючи алгоритм ми можемо домагатися зменшення кількості кластерів (точок збору даних ТА) і навпаки. До переваг алгоритму FOREL можна віднести: можливість змінювати кількість кластерів (ТА) в залежності від значення R , збіжність алгоритму, яка збільшується зі збільшенням R , незначна обчислювальна складність

$O(n^2)$. Недолік: результат роботи залежить від початкового рішення (для його покращення необхідно виконати декілька прогонів алгоритму з різними початковими даними і вибрати з них краще для задоволення певної цільової функції управління).

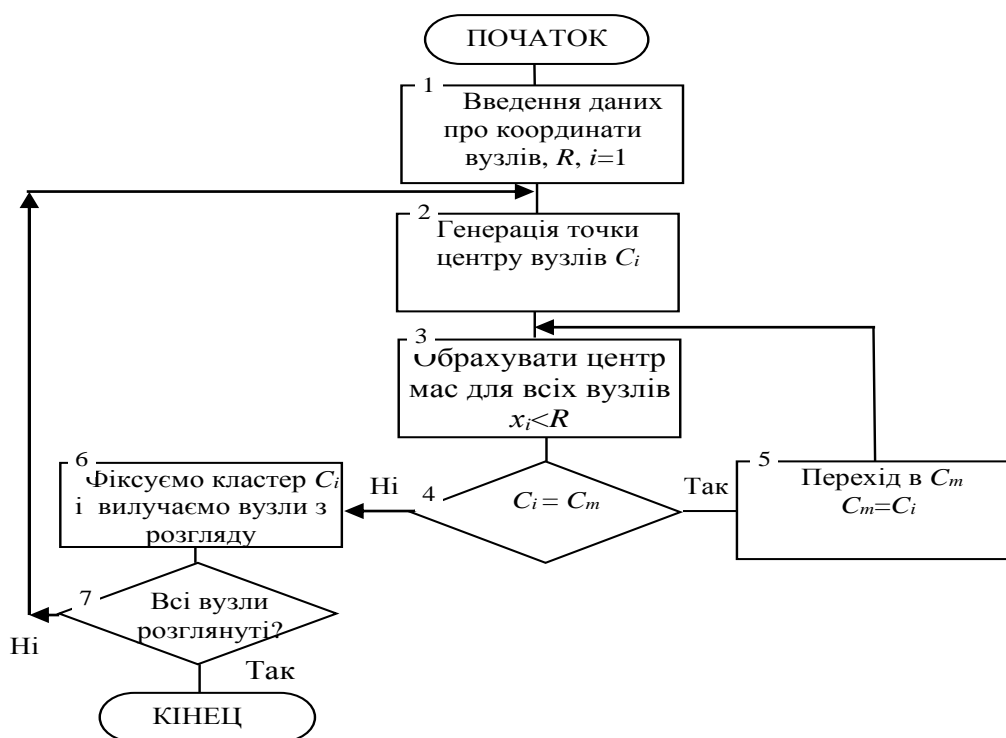


Рисунок 2.3 – Схема-алгоритм функціонування FOREL

На рис. 2.4 наведені результати кластеризації БСМ розмірності 50, 100 та 200 вузлів за допомогою алгоритму FOREL в середовищі MATLAB. В результаті кластеризації БСМ була розділена на 9 кластерів в мережі з 50 вузлів, на 13 кластерів в мережі зі 100 вузлів, на 15 кластерів в мережі з 200 вузлів.

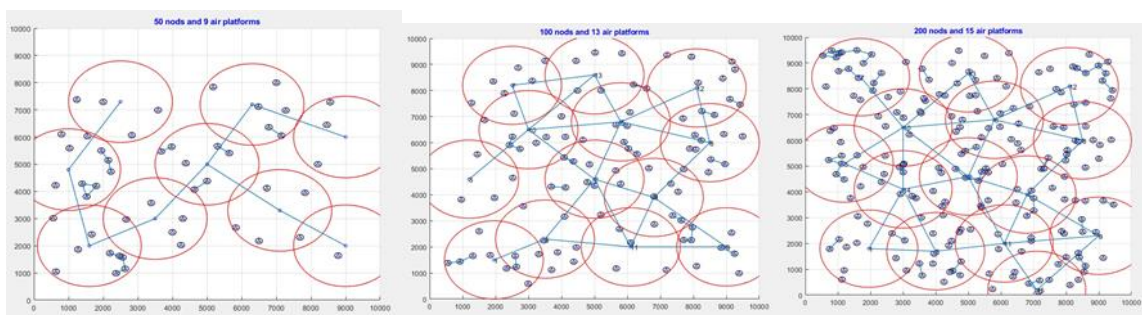


Рис. 2.4. Результати кластеризації мережі (метод FOREL)

На відміну від класичних підходів до реалізації FOREL при рішенні задачі збору даних ТА пропонується його модифікація (адаптація зони покриття та кількості вузлів в кластері) з метою досягнення цільових функцій управління та врахування ресурсних обмежень.

2.3.2. Алгоритм k -середніх

Аналогічно алгоритму FOREL алгоритм k -середніх вирішує завдання кластеризації шляхом мінімізації сумарного квадратичного відхилення вузлів кластерів від центрів мас цих кластерів [7, 66]. Функція мінімізації згідно виразу (2.11).

Також розглянемо цей алгоритм для площини. Кожен вузол розглядається як точка на площині з координатами (x_j, y_j) . Координати центру мас i -го кластера визначаються згідно виразу (2.12). Також кожен вузол (точка) може визначатись „масою” m_j . Тоді центр мас буде визначатись як центр мас плоскої фігури згідно виразу (2.13). Алгоритм кластеризації складається з наступних кроків:

1. Задаються межі області, координати вузлів $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ та необхідна кількість кластерів (k).
2. Вибір (випадковим чином) координат k -точок m_1, m_2, \dots, m_k в межах визначеної області. На початковому етапі ці точки приймаються за центри мас кластерів.
3. Всі вузли області $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ розподіляються та закріплюються за кластерами за найменшою відстанню від кожного вузла до центрів мас. Тобто, кожен з вузлів приписується до найближчого центру мас.
4. Для кожного з визначених кластерів обчислюються координати центрів мас за виразами (2.12) або (2.13) – $\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_k$. Отримані координати точок $\hat{m}_1, \hat{m}_2, \dots, \hat{m}_k$ порівнюються з попередніми координатами точок m_1, m_2, \dots, m_k . Якщо вони відрізняються, то процес пошуку кластерів продовжується, перехід до кроку 5.

Якщо координати точок збігаються з заданою точністю, то кластери знайдені і процес пошуку кластерів завершується.

Отримується інформація про кінцеве рішення: координати центрів мас кластерів та належність вузлів до кластерів. Кінець алгоритму.

5. Формування нових рішень $m_1 = \hat{m}_1, m_2 = \hat{m}_2, \dots, m_k = \hat{m}_k$ щодо центрів мас кластерів. Перехід до кроку 3.

Узагальнена схема-алгоритм функціонування методу k -середніх наведена на рисунку 2.5.

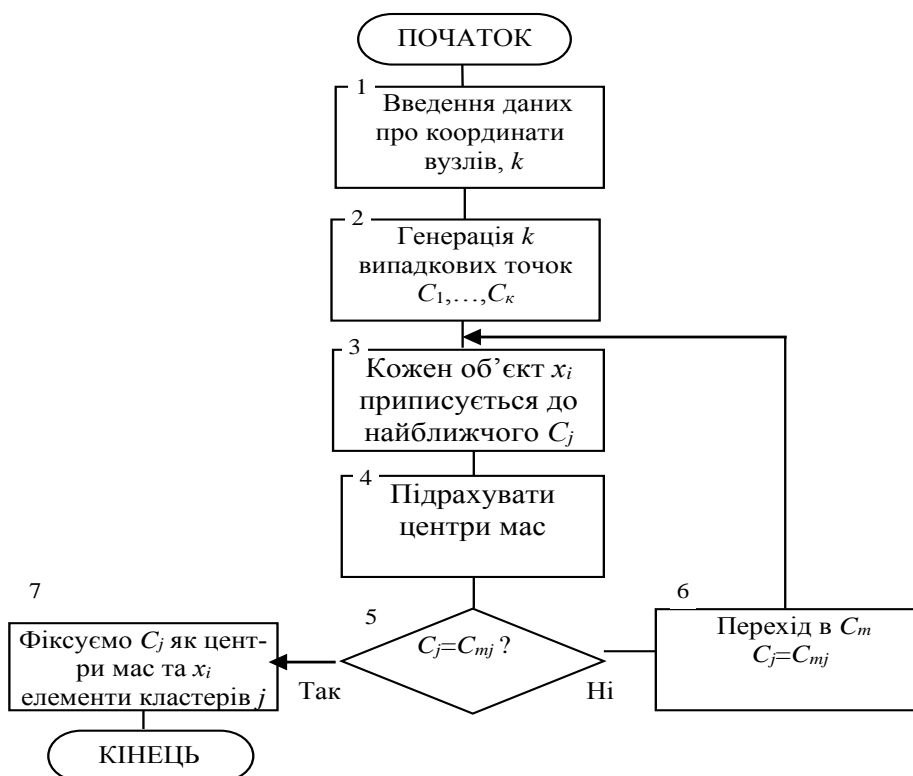


Рисунок 2.5 – Схема-алгоритм функціонування k -середніх

В результаті виконання алгоритму k -середніх множина вузлів буде розділена на k -кластерів з координатами центрів мас цих кластерів.

В процесі виконання алгоритму може виникнути ситуація, коли один або декілька кластерів виявляться порожніми, тоді потрібно визначити нові координати початкових точок та продовжити пошук рішення. Переваги алгоритму: незначна обчислювальна складність $O(n^2)$, отримання більш рівномірного розподілу вузлів по кластерах. Недоліки: не гарантує глобального оптимуму; вимагає заздалегідь

визначення кількості кластерів; результат кластеризації суттєво залежить від початкового рішення.

Розглянуті методи кластеризації дозволяють отримати декілька допустимих рішень, в тому числі близьких до оптимальних. Тому для досягнення заданих цільових функцій управління мережею з врахуванням наявних ресурсних обмежень доцільне використання обох методів і вибір найбільш прийняттого рішення. Для цього пропонується наступний алгоритм:

1. На початку пошуку рішення кластеризації проводиться аналіз вихідних даних і визначаються основні початкові дані: використання певної кількості (k) телекомунікаційних аероплатформ для методу k -середніх і значення радіусу зони покриття R телекомунікаційної платформи для методу FOREL.

2. Здійснюється пошук рішення за кожним методом кластеризації:

поділ БСМ на визначену кількість (k) кластерів (задіяних телекомунікаційних аероплатформ) для методу k -середніх;

поділ БСМ на мінімальну кількість кластерів за визначеним значенням R для методу FOREL.

3. Аналіз результатів кластеризації за кожним методом по виконанню: обмежень за кількістю ТА, граничною кількістю вузлів в кластері (вирази 2.9 та 2.10); ступеня досягнення цільових функцій управління.

При виконанні обмежень – допустиме рішення знайдено, перехід до кроку 5, інакше – перехід до кроку 4.

4. Зміна значення k (кількості задіяних ТА) для методу k -середніх або значення зони покриття R (для методу FOREL). Перехід до кроку 2.

5. Фіксація рішення. Оцінка значення переваги отриманого допустимого рішення. Якщо всі варіанти пошуку реалізовані, тоді кінець; інакше – перехід до кроку 4.

В результаті застосування двох алгоритмів буде отримано рішення, яке задовольнить визначену цільову функцію управління при наявних обмеженнях.

2.4 Модель розрахунку зони покриття ТА

2.4.1 Аналіз стандартів передачі даних для використання в БСМ

Для організації зв'язку між вузлами в безпроводових сенсорних мережах був розроблений стандарт IEEE 802.15.4 [67, 68]. До цього стандарту відноситься технологія ZigBee, що дозволяє створювати самоорганізуючі безпроводові мережі з автоматичною ретрансляцією повідомлень, з підтримкою стаціонарних і мобільних вузлів. Мережі ZigBee при відносно невеликих швидкостях передачі даних забезпечують гарантовану доставку пакетів і захист інформації. Стандарт ZigBee передбачає частотні канали в діапазонах 868 МГц, 915 МГц і 2,4 ГГц. Найбільші швидкості передачі даних та найвища стійкість досягаються в діапазоні 2,4 ГГц. Швидкість передачі даних разом зі службовою інформацією в каналі становить 250 Кбіт/с. При цьому середня пропускна спроможність вузла для корисних даних в залежності від завантаженості мережі та кількості ретрансляцій може лежати в межах 5...40 Кбіт/с. Відстані між вузлами мережі становлять десятки метрів під час роботи в середині приміщення і сотні метрів на відкритому просторі. За рахунок ретрансляції зона покриття мережі може значно збільшуватися. Мережа ZigBee відноситься до класу Mesh-мереж: кожний вузол може зв'язатися з будь-яким іншим вузлом як безпосередньо, так і через проміжні вузли мережі.

Безпроводова мережа Bluetooth в класичному розумінні (IEEE 802.15.1) – це однорангова мережа зі змінною кількістю мобільних вузлів з децентралізованим управлінням, яка може бути розгорнута в обмеженому просторі (з кількістю вузлів до 80) [67, 68]. Радіозв'язок Bluetooth здійснюється в безліцензійному ISM-діапазоні (2,4 ... 2,4835 ГГц) зі швидкостями 1 Мбіт / с (версія 1.2); 3 Мбіт / с (версія 2.0); 24 Мбіт / с (версія 3.0). Для Bluetooth характерно стихійне створення мережі масового користувача, коли практично будь-яка людина, володіючи таким радіоінтерфейсом, може до неї легко підключитися, якщо, звичайно, не вирішена політика безпеки від несанкціонованого доступу. Це стає першорядним завданням при використанні технології Bluetooth для безпроводової сенсорної мережі.

Wi-Fi технологія дозволяє будувати безпроводові самоорганізуючі мережі, в тому числі MESH топологію з безпроводовою точкою доступу для підключення вузлів. У мережах Wi-Fi використовуються кілька модифікацій стандарту 802.11 [62]. Стандарт 802.11 передбачає передачу даних з використанням двох діапазонів частот 2,4 та 5 ГГц. Швидкість та дальність передачі залежить від стандарту.

Порівняльний аналіз технологій БСМ наведено в таблиці 2.1 [67, 68]. Властивості мережі залежать від багатьох факторів: характеристики зони обслуговування, кількості і розподілу вузлів на місцевості або в просторі, їх параметрів тощо. При значній кількості вузлів для їх взаємодії та передачі даних використовується кластеризація мережі. Кластерна організація є ефективною і масштабується для функціонування, але лише за умови раціонального вибору головних вузлів кластерної мережі в конкретний момент часу.

З результатів порівняння технологій (табл. 2.1) можна зробити висновок, що IEEE 802.11 має найкращу швидкість передачі, більшу дальність, малі витрати енергії на біт інформації при її передачі, однак для цього потрібне дуже високе пікове споживання енергії, що обмежує вибір джерел енергії. В подальшому в моделях для оцінки ефективності будемо використовувати протоколи IEEE 802.11.

Таблиця 2.1 – Порівняння характеристик основних технологій БСМ

Параметри	Bluetooth	ZigBee	IEEE 802.11
Частоти	2.4 ГГц	0.868/0.91/2.4 ГГц	2.4, 4–6 ГГц
Кількість каналів	79	1 /10 /16	14
Швидкість передачі	до 3 Мбіт/с	20-250 Кбіт/с	802.11b - до 11 Мбіт/с, 802.11g - до 54 Мбіт/с, 802.11n - до 300 Мбіт/с, 802.11ac – до 3.39 Гбіт/с
Рівень OSI	Фізичний, канальний	Фізичний, канальний, мережевий	Фізичний, канальний
Доступ до середовища	FHSS	DSSS	DSSS, CCK, OFDM
Використання MIMO	так	так	так
Кількість вузлів БСМ	80	65000	2007
Рівень потужності	0-30дБм	від 0дБм (1 мВт)	20 дБм
Витрати енергії на біт та пікові значення струму	0.153 мкВт/біт, 40 mA - передача, очікування 0.2 mA	185.9 мкВт/біт, 30 mA передача, очікування - 3μA	0.00525 мкВт/біт, 400mA - передача, очікування 20mA
Радіус дії	до 10 м	до 10 - 100 м	до 150 - 250 м

2.4.2 Основні характеристики стандарту передачі даних IEEE 802.11

Пропускна здатність є важливим показником ефективності функціонування радіоканалу. Вона визначається як фактична швидкість передачі інформації та, зазвичай, вимірюється в бітах на секунду. Формула Шенона дає теоретичний максимум $s = \Delta F \log_2(1 + SNR)$, де s – пропускна здатність в бітах за секунду, $SNR = P_c/N$ – співвідношення сигнал/шум у каналі, P_c – потужність сигналу на вході приймача в каналі, N – потужність шуму, ΔF – ширина смуги каналу в герцах. Потужність сигналу на вході приймача в загальному випадку у вільному просторі визначається [62, 67 – 70]

$$P_c = (P_t G_t G_r \lambda^2) / ((4\pi)^2 d^\alpha),$$

де P_t – потужність передачі вузла, G_t і G_r – коефіцієнти посилення передавача і приймача відповідно, λ – довжина хвилі ($\lambda = c/f$, де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, f – несуча частота), d – відстань між двома вузлами, а α – коефіцієнт загасання. В [68] показано, що задля забезпечення зв'язку між повітряним і наземним об'єктом $\alpha = 2,25$. У той же час між наземними сенсорними вузлами зазвичай значення α дорівнює 3 або 4.

У стандарті IEEE 802.11 [62] в певних режимах роботи дані можуть передаватися з різними швидкостями, які тісно пов'язані з параметрами радіоканалу, такими як чутливість приймача P_{\min} , відношення SNR та смуга пропускання ΔF (наприклад, характеристики IEEE 802.11n наведені в табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Характеристики режимів роботи IEEE 802.11n

MCS	Модуляція, кодування	Ширина каналу 20 МГц				Ширина каналу 40 МГц			
		Швидкість, Мб/с				Швидкість, Мб/с			
		GI=800 ns	GI=400 ns	min SNR, dBm	RSSI, P_{\min} , дБм	GI=800 ns	GI=400 ns	min SNR, dBm	RSSI, P_{\min} , дБм
MCS0	BPSK-1/2	6,5	7.2	2	-82	13.5	15	5	-79
MCS1	QPSK-1/2	13.0	14.4	5	-79	27	30	8	-76
MCS2	QPSK-3/4	19,5	21.7	9	-77	40.5	45	12	-74
MCS3	16QAM-1/2	26	28.9	11	-74	54	60	14	-71
MCS4	16QAM-3/4	39	43.3	15	-70	81	90	18	-67
MCS5	64QAM-2/3	52	57.8	18	-66	108	120	21	-63
MCS6	64QAM-3/4	58,5	65	20	-65	121.5	135	23	-62
MCS7	64QAM-5/6	65	72.2	25	-64	150	150	28	-61
...
MCS31	64QAM-5/6	260	288.9	25	-64	540	600	28	-61

Звичайно специфікація безпроводового мережевого обладнання містить таблицю відповідності швидкостей передачі і чутливості приймача.

В табл. 2.3 наведено залежності швидкості передачі від дальності при використанні протоколу IEEE 802.11g [68].

Таблиця 2.3 – Залежність швидкості передачі даних від відстані для протоколу IEEE 802.11g при $BER \leq 10^{-5}$

Швидкість передачі s , Мб/с	Відстань, м	Швидкість передачі s , Мб/с	Відстань, м
Для коефіцієнта загасання $\alpha=2.25$ (між вузлом і ТА)			
54	54	12	204
48	69	9	219
36	114	6	261
24	146	2	328
18	189	1	d_{\max}
Для коефіцієнта загасання $\alpha=3.0$ (між вузлами БСМ)			
54	20	12	54
48	24	9	57
36	35	6	65
24	42	2	77
18	51	1	d_{\max}

Збільшення дальності радіозв'язку призводить до збільшення витрат енергії на передачу. Крім цього граничне збільшення дальності радіозв'язку обмежено малою потужністю передавачів вузлів. Приклад різних значень розмірів зон радіозв'язку R від висоти польоту h ТА при використанні секторних антен та дальності передачі $d_{\max} = 250$ м (ТА - сенсорні вузли) показані на рис. 2.6 [70].

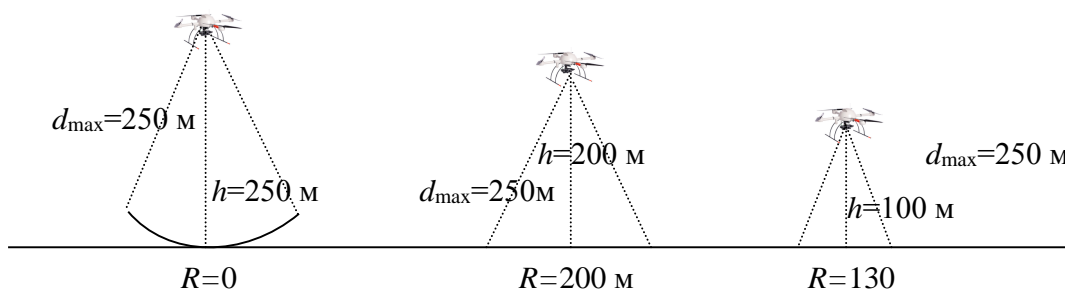


Рис. 2.6. Залежності розміру зони радіозв'язності R від h ТА при $d_{\max} = 250$ м.

В той же час від висоти польоту та дальності радіозв'язку залежить енергія, яка витрачається на передачу, та швидкість передачі. Збільшення відстані між вузлом і ТА призводить до збільшення витрат енергії на передачу. Крім цього, граничне збільшення дальності радіозв'язності обмежено малою потужністю передавачів вузлів (табл. 2.4) [68].

Таблиця 2.4 – Залежність витрат енергії вузлів від відстані передачі

Вихідна потужність (dBm)	Вихідна потужність (mW)	Споживання (mA)	Дальність передачі (м)
0	1.000	17.4	250
-1	0.791	16.5	228
-3	0.501	15.2	189
-5	0.316	13.9	158
-7	0.199	12.5	131
-10	0.100	11.2	100
-15	0.0316	9.9	63
-25	0.00316	8.5	25

2.4.3. Оцінка кількості вузлів зони покриття ТА

При плануванні локальної безпроводової мережі завдання визначення розміру зон покриття мережі з точки зору кількості вузлів та їх розміщення є одним з найважливіших [71 – 74]. Необхідно забезпечити задану пропускну здатність обміну користувача в умовах, які визначаються фізичним та канальними рівнями протоколу (наприклад, IEEE 802.11). У реальних мережах корисна пропускну здатність в розрахунку на конкретне застосування (користувача) помітно відрізняється від швидкості, згідно номінальної швидкості передачі пакетів у середовищі передачі – індекс MCS (Modulation and Coding Sequence). Частину ресурсів на передачу корисних даних забирає службовий трафік. Корисний трафік складає лише частину загального навантаження на мережу і з точки зору тривалості ефірного часу його частка може падати до 40 – 50%. Так в табл. 2.5 показана середня оцінка пропускну здатності для корисного навантаження мережі в нормальних радіочастотних умовах згідно роботи [71, 72].

Таблиця 2.5 – Середня оцінка пропускної здатності для корисного навантаження

Протокол, режим роботи	Пропускна здатність (Мбіт/с)
802.11b	7,2
802.11b/g	13
802.11g	25
802.11a	25
802.11n – HT20, 1SS, MCS7	25
802.11n – HT20, 2SS, MCS15	70
802.11n – HT40, 2SS,	160

Нам необхідно визначити максимальну кількість вузлів, які можуть одночасно працювати на одному каналі, при збереженні необхідної швидкості передачі в зоні. Гранична кількість вузлів визначається швидкістю передачі даних у зоні в розрахунку на вузол (питомою швидкістю передачі даних), яка відповідає обраній продуктивності зони з поправкою на сукупність вузлів. Значення номінальних, сумарних швидкостей в зоні і значення питомих пропускних спроможностей вузлів представлені в (табл. 2.6) [73].

Таблиця 2.6 – Пропускна здатність зони мережі

Версія стандарту	Номінальна швидкість передачі (Мбіт/с)	Сумарна пропускна здатність (Мбіт/с)	Кількість користувачів	Питома пропускна здатність (Кбіт/с)
802.11b	11	7.2	10	720
802.11b	11	7.2	20	360
802.11b	11	7.2	30	240
802.11b/g	54	13	10	1 300
802.11b/g	54	13	20	650
802.11b/g	54	13	30	430
802.11a	54	25	10	2 500
802.11a	54	25	20	1 250
802.11a	54	25	30	833
802.11n MCS7	72,2	35	10	3 500
802.11n MCS7	72,2	35	20	1 750
802.11n MCS7	72,2	35	30	1 160

Для визначення числа одночасно працюючих користувачів, виробник рекомендує вибрати граничне число користувачів для кожної точки доступу (5 ГГц, HT20) при заданій продуктивності зони за табл. 2.7 (Мбіт/с). Вказані в таблиці

значення пропускної здатності є досить умовними і виконані для доповнень стандарту IEEE 802.11a/n, але цілком можуть послужити орієнтиром.

Таблиця 2.7 – Результати тесту для користувачів з різним обладнанням

Режими роботи	Кількість абонентів у зоні				
	10	20	30	40	50
100 % HT20	5,99	2,99	1,81	1,30	0,94
75 % HT20 / 25 % OFDM	4,69	2,20	1,46	1,03	0,77
50 % HT20 / 50 % OFDM	4,17	1,73	1,10	0,75	0,54
25 % HT20 / 75 % OFDM	3,96	1,72	1,07	0,68	0,56
100 % OFDM	1,50	0,75	0,50	0,36	0,28

Пропускна здатність зони безпроводової мережі визначається обсягом доступного вузлам ресурсу часу в радіоканалі і швидкостями передачі даних, на яких вони можуть його використовувати. Число кадрів службового трафіку (control frames) при значному навантаженні в умовах великого числа активних користувачів зростає більш ніж в 3 рази. Службовий трафік (control frames) може становити 50 – 60% від загального обсягу кількості кадрів [71 – 73].

Середня кількість вузлів зони ТА (при однаковому об'ємі даних):

$$n_{\text{кл}} = s_{\text{ТА}} k_{\text{ст}} / \sum_{i=1}^n s_i,$$

де $s_{\text{ТА}}$ – швидкість передачі ТА згідно МАС-протоколу, s_i – швидкість передачі наземного вузла, $k_{\text{ст}} = 0.5 \dots 0.6$ – частка швидкості передачі для обслуговування службового трафіку, яку вносять всі рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

2.5. Модель розрахунку часу збору даних ТА з вузлів мережі

ТА виконує роль головного вузла кластерів мережі та здійснює тимчасову кластеризацію вузлів наземної мережі, які випадково розміщені на території моніторингу [18, 20]. Припустимо, що ТА рухається по заданій траєкторії, тоді час збору даних залежить від швидкості переміщення ТА. Можна запропонувати різні варіанти руху ТА при зборі даних: з постійною швидкістю, змінною, яка буде залежить від розташування вузлів та ймовірності правильної передачі даних; з

гарантією якості обслуговування (ТА повинен зібрати всі дані) або заданою ймовірністю обслуговування. Вибір швидкості передачі при зборі даних обмежується технічними можливостями польоту летального апарату, відстанню між вузлами, щільністю розташування вузлів, прийнятими протоколами фізичного та каналного рівнів моделі OSI.

При нерухомому стані ТА час збору даних буде визначатися кількістю J вузлів в k -кластері, швидкістю передачі s_j (залежить від відстані між вузлом і ТА) та обсягом даних моніторингу V_{dmj} між ТА з визначеними вузлами

$$t_{збk} = \sum_{j=1}^J \left(\frac{V_{dmj}}{s_j} \right).$$

А загальний час збору буде визначатися сумою часів збору в кластерах та часів підльоту до них при умові прийнятої якості обслуговування всіх вузлів в кластерах (рис. 2.6)

$$T_{зб} = \sum_{k=1}^K t_{збk} + \sum_{k=1}^{K-1} \frac{l_{k,k+1}}{v_{k,k+1}},$$

де l_k , $v_{k,k+1}$ – відстань та швидкість польоту ТА між k та $k+1$ кластерами.

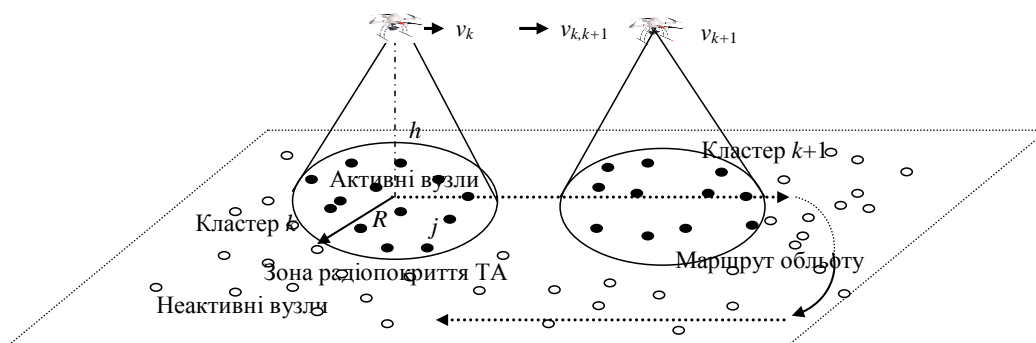


Рисунок 2.6 – Приклад збору даних при динамічній кластеризації мережі

При визначеній швидкості переміщення ТА можна розрахувати час знаходження конкретного вузла в зоні покриття та визначити границю області в якій будуть обслужені вузли.

Висота польоту h визначає розмір площі покриття. Збільшення h призводить до збільшення: витрати палива (енергії) у ТА, витрат енергії вузлів і ТА на процес передачі через збільшення відстані, зміни площі покриття, числа вузлів, що

потрапляють в зону радіозв'язку і здатних передати дані моніторингу, і навпаки. Тому висота польоту повинна бути визначена з урахуванням цільових функцій управління мережею і обмежень на її ресурси, директивних вимог. При цьому висота польоту може бути обмежена максимальною дальністю радіозв'язності.

Крім цього, наземні вузли можуть знаходитися в зоні радіозв'язку з ТА лише обмежений час, тому за цей час необхідно встигнути передати дані моніторингу $V_{\text{дм}}$ від множини вузлів, що знаходяться в зоні радіозв'язку, до ТА, за умови того, що час прийому-передачі інформації від вузла до ТА обмежений часом його прольоту $t_{\text{пр}} = l/v$, де l – довжина маршруту переміщення ТА в межах радіозв'язку з вузлом, v – швидкість польоту (рис. 2.7).

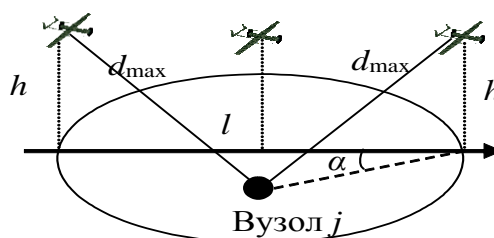


Рисунок 2.7 – Пояснення розрахунку часу обльоту

Максимальний час прольоту (при прямолінійному переміщенні) залежить від висоти польоту, максимальної дальності радіозв'язку d_{max} між вузлом j і ТА, швидкістю передачі в радіоканалі та визначається формулою

$$t_{\text{пр}j} = (2\sqrt{d_{\text{max}}^2 - h^2} \cos \alpha) / v,$$

де d_{max} – максимальна дальність радіозв'язку при забезпеченні певної швидкості передачі. За час прольоту вузол повинен встигнути передати до ТА дані. Тобто час прольоту ТА j -го вузла $t_{\text{пр}j}$ має бути більше або дорівнювати часу передачі $t_{\text{пер}j}$ від вузла до ТА. Час передачі $t_{\text{пер}j}$ дорівнює співвідношенню швидкості передачі s (залежить від відстані d між вузлом і ТА і протоколу канального рівня $\Pi_{\text{ку}}$) до обсягу переданих даних $V_{\text{дм}j}$.

$$t_{\text{пр}j} = l/v = 2\sqrt{d_{\text{max}}^2 - h^2} \cos \alpha / v \geq t_{\text{пер}j} = V_{\text{дм}j} / s(d, \Pi_{\text{ку}}),$$

$$0 < d \leq d_{\text{max}}, 0 \leq v \leq v_{\text{max}}, V_{\text{дм}j} \leq V_{\text{дм} \text{max}}.$$

Тобто ТА після входження в радіозв'язок з вузлом вибирає швидкість переміщення і висоту для забезпечення необхідного часу передачі $t_{\text{пер}}$ між ними.

Сумарний час польоту (збору даних) всіх вузлів $j = 1 \dots J$ (або точок збору даних) повинен бути мінімальним. Тоді

$$T_{\text{зб}} = \sum_{j=1}^{J-1} t_{\text{пр}j, j+1} / v_{j, j+1} \rightarrow \min \quad (2.13)$$

$$t_{\text{пр}j} \geq t_{\text{пер}j} = s(d, \Pi_{\text{ку}}) / (V_{\text{дм}j}), \quad (2.14)$$

$$t_{\text{пер}j} = t_{\text{всзв}j} + t_{\text{оч}j} + t_{\text{пер}j},$$

Час передачі $t_{\text{пер}j}$ складається з інтервалів: встановлення зв'язку $t_{\text{всзв}j}$ (обмін відповідними службовими повідомленнями), очікування передачі $t_{\text{оч}j}$ (згідно протоколу множинного доступу) та безпосередньо передача даних моніторингу $t_{\text{пер}j}$ (залежить від відстані та протоколів канального та фізичного рівнів).

Тому висота польоту повинна бути оптимізована з урахуванням цільових функцій управління мережею і обмежень на її ресурси, директивних вимог. При цьому швидкість передачі також залежить від відстані (табл. 2.2, 2.3). Тому час обміну даними не повинен перевищувати час існування радіоканалу при польоті ТА над цим вузлом.

2.6. Правила корегування базового маршруту польоту в кластерах

Базовий маршрут розраховується центром управління мережею на основі знання координат точок збору та польотних характеристик ТА. Для рішення задач багатокритеріальної оптимізації, яке необхідно досягати під час збору даних, пропонується використовувати метод послідовних поступок. Відповідно до цього методу критерії попередньо ранжуються за важливістю. Потім шукається оптимальне рішення по найбільш важливому критерію. На наступному кроці здійснюється пошук найкращого рішення за наступним за важливістю критерієм, причому допускається втрата в значенні першого критерію не більше ніж на деяку обумовлену величину, тобто робиться поступка за першим критерієм. На третьому кроці оптимізується рішення по третьому критерію, при заданих поступках по

першому і другому тощо, поки не буде розглянуто останній за важливістю критерій.

Розглянемо більш детально критерії та правила їх досягнення.

1. Мінімізація (обмеження) часу збору $T_{зб}$ даних моніторингу (вираз 2.1).

Час збору даних залежить як від кількості ТА, їх технічних характеристик (швидкість, висота, дальність, тривалість польоту, радіообладнання, алгоритми збору даних і ін.), умов польоту (погодні умови тощо), так і від траєкторії руху.

Траєкторія руху ТА залежить від точок збору, які визначені відповідним алгоритмом кластеризації. Від траєкторії залежить довжина маршруту ТА і час збору даних моніторингу. У той же час від висоти польоту (дальності радіозв'язку), залежать витрати енергії на передачу і швидкість (час) обміну.

Якщо пріоритет цільової функції управління $T_{зб} \rightarrow \min$ – мінімальний час збору (а решта розглядаються як обмеження), то необхідно:

методами кластеризації намагатись побудувати найменшу кількість точок збору (кількість кластерів);

траєкторію переміщення ТА планувати в вигляді ліній між центрами кластерів;

переміщення між кластерами здійснювати на максимальній швидкості;

в кластерах переміщатися з максимальною швидкістю (при негарантованій якості обслуговування) або швидкість ТА визначається зі значенням достатнім для часу прийому даних від вузлів кластера (при гарантованій якості обслуговування).

Якщо розглядається завдання збору даних при виконанні обмеження на граничний час збору ($T_{зб} \leq T_{збзад}$), то СУ ТА намагається застосовувати правила (стратегії) обльоту та планування передач, які б зменшували втрати енергії вузлів і ТА (корегування маршруту обльоту вузлів кластера: обліт на мінімальній відстані, обліт вузлів з критичною енергією тощо).

Збільшення дальності радіозв'язку призводить до збільшення витрат енергії на передачу. Крім цього граничне збільшення дальності радіозв'язку обмежено малою потужністю передавачів вузлів. При цьому швидкість передачі даних також

залежить від відстані. Тому час обміну даними не повинен перевищувати час існування радіозв'язку при польоті ТА над вузлом.

2. Максимізація часу функціонування сенсорної мережі T_{Φ} (вираз 2.2).

Збільшення часу функціонування мережі будемо домагатися застосуванням спеціальних правил зменшення (перерозподілу) витрати енергії батарей вузлів при передачі, а саме:

Правило 1. Зменшення відстані між сенсорним вузлом і ТА – мінімальна висота польоту ТА для конкретного кластера (підбір величини зони радіозв'язку R).

Правило 2. Призначення точок обміну даними для вузлів, що знаходяться найближче до траєкторії польоту (рис. 2.8а).

Правило 3. Обліт вузлів з малою енергією батарей на гранично малій відстані.

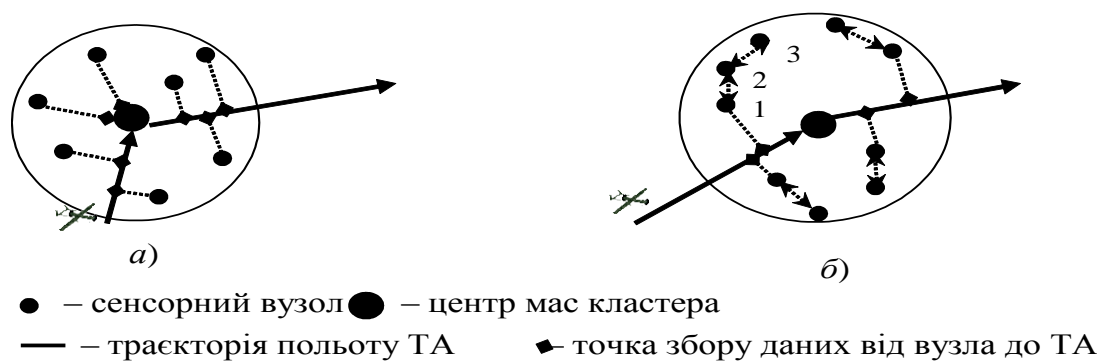


Рисунок 2.8 – Правила зменшення витрат енергії при передачі даних

Правило 4. Кооперативна робота групи близько розташованих вузлів для формування „мінікластера” для організації передачі даних через вузли, які наближені до траєкторії польоту ТА.

Для цього, вузли, які близько розташовані між собою, обмінюються між собою службовими повідомленнями для вибору так званого „вузла-рандеву”, найближчого до траєкторії польоту ТА. Потім між цими вузлами будують маршрути передачі від сусідніх вузлів до вузла-рандеву за згортою метрик: мінімальна потужність передачі і залишкова енергія батарей (рис. 2.8б) (більш детально у 4-му розділі). Так, наприклад, потужність, що витрачається на передачу

між вузлом 3 і ТА $P_{3-ТА} \gg P_{3-2}$ значно більша, ніж потужність, що витрачається на передачу між 3-м і 2-м вузлами $(P_{3-2} + P_{2-1} + P_{1-ТА}) < (P_{1-ТА} + P_{2-ТА} + P_{3-ТА})$. Далі дані моніторингу в віддалених вузлах передаються за побудованим маршрутом вузлу-рандеву, який зберігає їх та передає ТА при встановленні з ним радіозв'язності.

Правило 5. Встановлення рівня передачі між вузлами, вузлом і ТА на мінімальному рівні. Забезпечується зменшенням потужності передачі між сусідніми вузлами зі збереженням необхідних параметрів радіоканалу: необхідного рівня відносини сигнал/перешкода, ймовірності бітової помилки (BER) і ін.

3. Мінімізація кількості ТА, які необхідні для збору даних з заданою якістю (вираз 2.3) буде досягатися мінімізацією точок покриття (кількості кластерів) при застосуванні розроблених алгоритмів кластеризації та поступовим залученням ТА для виконання завдань.

2.6. Узагальнений алгоритм методу безпосереднього збору даних з вузлів БСМ з їх кластеризацією ТА

Схема узагальненого алгоритму реалізації безпосереднього збору даних з БСМ з їх кластеризацією ТА наведена на рис. 2.9. Розглянемо основні кроки.

1. Збір та введення даних про параметри БСМ: множина сенсорних вузлів $S = \{s_i\}$, $i = 1 \dots n$ та їх координати розміщення на місцевості (x_i, y_i) ; параметри вузлів (протоколи інформаційного обміну та їх характеристики); множина ТА $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_K\}$, $k = 1 \dots K$; параметри ТА (тип, час польоту, протоколи інформаційного обміну, максимальна швидкість переміщення, висота польоту h , яка визначає радіус зони покриття $R = [R_{\min}, R_{\max}]$, спочатку $R = R_{\max}$), вихідна та кінцева точка польоту ТА; граничний час збору даних $T_{\text{збзад}}$; мінімально необхідний час функціонування БСМ $T_{\text{фзад}}$; цільові функції управління (2.1) – (2.3) та ієрархія їх пріоритетів тощо.

4. Перевірка (блок 4): ЯКЩО пріоритет цільової функції $\min T_{зб}$ ТОДІ поділити маршрут обльоту на незалежні маршрути для всієї множини ТА і перехід до блоку 2.

5. Обчислення мінімального часу збору даних одним ТА (блок 5): $T_{зб\min} = L_m/v_{\max}$, де L_m – довжина базового маршруту, v_{\max} – максимальна швидкість польоту.

6. Перевірка виконання заданих вимог по часу збору даних:

ЯКЩО $T_{зб\min} \leq T_{зб\text{зад}}$ ТОДІ $R' = kR$ – зменшити значення R (висоту h) – блок 10;

ЯКЩО $R' < R'_{\min}$ (бл. 15) ТОДІ перехід на блок 7.

ІНАКШЕ $R = R'$, перехід до бл. 2;

ІНАКШЕ ЯКЩО $\{U\} \neq 0$ (перевірка наявності ТА – бл.14)

ТОДІ $TA = TA + 1$ (додати ТА – блок 13),

розбити маршрут на нову кількість ТА (блок 12)

і виконати алгоритм для кожної підмережі окремо, перехід до блоку 2.

ІНАКШЕ КІНЕЦЬ;

7. Реалізація правил (блок 7):

№ 3 – скорегувати базовий маршрут для обльоту на найближчій відстані для вузлів з критичною енергією батареї (з перевіркою виконання умови $T_{зб} \leq T_{зб\text{зад}}$).

№ 2 – призначити точки обміну даними, які знаходяться ближчими до траєкторії польоту ТА (рис. 2.8а).

№ 4 – організувати кооперативну роботу вузлів, які розташовані близько один від одного (вузли одного мінікластера), по побудові енергоефективних маршрутів передачі даних к траєкторії польоту ТА (рис. 2.8б).

8. ЯКЩО всі правила використані, ТОДІ КІНЕЦЬ, ІНАКШЕ – на крок 7.

Так як у вихідних даних можливе упорядкування критеріїв за важливістю, то завдання багатокритеріальної оптимізації будемо вирішувати, використовуючи метод послідовних поступок.

У разі пріоритету цільової функції $\min T_{зб}$ крок 4 алгоритму розподіляє маршрут обльоту між усіма ТА. Початкова реалізація алгоритму із значенням $R = R_{\max}$ намагається мінімізувати кількість точок збору і відповідно час збору даних. Потім при задоволенні $T_{зб} \geq T_{зб\text{зад}}$ намагаємося зменшити потужність

передачі (витрат енергії), зменшуючи R і застосовуючи відповідні правила зменшення потужності передачі. Мінімізація кількості задіяних ТА вирішується за рахунок додавання в роботу тільки по одному ТА для задоволення тих чи інших вимог.

Для практичної перевірки результатів функціонування алгоритму здійснена його програмна реалізація в середовищі MATLAB. Проведено експерименти і отримані залежності: часу збору даних, часу функціонування мережі від розмірності мережі; середньої витрати енергії вузлів при різній кількості об'єктів при застосуванні різних алгоритмів збору даних. Показано, що запропонований алгоритм дозволяє підвищити ефективність процесу збору даних з використанням ТА (розділ 5).

Застосування методу дозволяє отримати вигоду у часі збору даних моніторингу мережі на 10 – 15 % (за рахунок зменшення точок збору даних), та збільшити час функціонування мережі на 12 – 17 % (за рахунок нових правил об'єкту вузлів в кластерах) у порівнянні з існуючими центроїдними методами безпосереднього збору даних.

Висновки до 2 розділу

1. Запропоновані основні етапи синтезу методу безпосереднього збору даних в вузлів БСМ з їх кластеризацією ТА: визначення алгоритмів кластеризації мережі, побудова точок збору даних моніторингу, побудова маршрутів об'єкту точок збору, організація процесу обміну між вузлами і ТА.

2. Для тимчасової кластеризації мережі в якості головного вузла кластера запропоновано використовувати ТА, який реалізує (на відміну від існуючих центроїдних алгоритмів) модифіковані ітераційні алгоритми кластерного аналізу FOREL (k -середніх) та знаходить мінімальну (задану) кількість точок збору даних.

Запропонований узагальнений алгоритм збору даних, який на основі відомого радіуса покриття ТА і координат положення сенсорних вузлів буде кінцеву мінімальну кількість кластерів.

3. Базовий маршрут обльоту точок збору даних будується за одним з відомих методів побудови найкоротшого шляху (рішення задачі комівояжера), наприклад, методом пошуку найближчого сусіда, який має незначну обчислювальну складність та близькі до оптимальних рішення.

Для обльоту вузлів кластерів запропоновані правила корегування базового маршруту обльоту, які враховують пріоритет певних цільових функцій управління мережею: мінімізація часу збору даних моніторингу, зменшення витрат енергії батарей (максимум часу життя мережі) і мінімізацію числа ТА.

4. Запропоновані аналітичні моделі оцінки часу збору даних ТА про стан вузлів мережі, розмірності кластерів, які дозволяють здійснювати планування траєкторії переміщення та оцінювати ефективність прийнятих рішень.

5. Запропонований узагальнений алгоритм реалізації методу безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами, який дозволяє:

скоротити маршрут обльоту і, відповідно, час збору даних за рахунок мінімізації кількості кластерів (точок збору даних моніторингу);

збільшити час функціонування мережі за рахунок зменшення потужності (дальності) передач між ТА і сенсорними вузлами, адаптації радіусу покриття ТА, знаходження найближчих точок обміну від маршруту переміщення ТА, побудови енергоефективних маршрутів передачі даних між вузлами мережі і ТА.

6. Для практичної перевірки результатів функціонування алгоритму здійснена його програмна реалізація в середовищі MATLAB. Проведено експерименти і отримані залежності: часу збору даних, часу стабільного функціонування мережі від розмірності мережі; середньої витрати енергії вузлів при різній кількості обльотів при застосуванні різних алгоритмів збору даних. Показано, що запропонований алгоритм дозволяє підвищити ефективність процесу збору даних з використанням ТА. В порівнянні з повним обльотом площі моніторингу дозволяє скоротити довжину маршруту збору даних 1.5-2 рази, забезпечити гарантоване обслуговування вузлів.

Застосування методу дозволяє отримати вигреш у часі збору даних моніторингу мережі на 10 – 15 % (за рахунок зменшення точок збору даних), та збільшити час функціонування мережі на 12 – 17 % (за рахунок нових правил обльоту вузлів в кластерах) у порівнянні з існуючими центроїдними методами безпосереднього збору даних.

7. Проведений аналіз чотирьох стратегій обльоту кластера (тільки між центрами точок збору; обліт критичних; передача в точках, ближчих до маршруту обльоту; кооперативна) показав переваги кооперованої стратегії, яка дозволяє в порівнянні з іншими до 15 % зменшити витрати енергії вузлів в кластерах.

РОЗДІЛ 3

ВДОСКОНАЛЕНА ТРАЄКТОРНО-ПОЗИЦІЙНА МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ МІЖ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЮ АЕРОПЛАТФОРМОЮ ТА ВУЗЛАМИ КЛАСТЕРА

Попередні дослідження в [74 – 79] виявили, що існуючі протоколи канального рівня [4, 62, 67, 68], які запропоновані для БСМ, не ефективні для мереж з ТА. Протоколи випадкового доступу, по-перше, вносять значну затримку в передачі даних між вузлами і ТА (ця затримка стає більш значною при високій щільності вузлів та є причиною значної кількості помилок в повідомленнях). По-друге, необхідно вирішувати проблему „прихованого терміналу”.

В роботі [74] запропонований протокол випадкового доступу з сигналом зайнятості, який надає ТА при обміні даними між ним та вузлом. Пріоритет початку передачі надається вузлам, які розташовані на найбільшій відстані між вузлом і ТА. Однак початкова процедура взаємодії між ТА і вузлами кластера має випадковий характер типу АЛОНА, тому має значні витрати пакетів при збільшенні щільності вузлів. Не враховується наявна енергія вузла.

В роботах [75, 76] запропонований протокол пріоритетного доступу PFSC-MAC вузлам в радіоканалі вузол-ТА, які знаходяться в певних зонах та відрізняються певною відстанню між вузлами. Однак ця умова призводить до того, що лише невеликій частині активних вузлів дозволяється передавати свої дані одночасно. Отже, період часу для всіх передач вузлів значний. Можливі втрати передач вузлів із-за колізій. Основна ідея роботи [78] полягає також в розподілі активних вузлів на декілька груп, на кожен з яких виділений часовий сегмент (TDMA), однак при невідомій кількості вузлів в групі не буде забезпечена гарантована якість обслуговування. Розподіл на групи здійснюється за рівнем сигналу прийому. Для уникнення колізій запропоновано використовувати кодовий поділ каналів (CDMA), що також додає додаткових труднощів для реалізації в порівнянні з часовим поділом (TDMA).

Таким чином, запропоновані методи канального рівня не забезпечують гарантії якості обслуговування вузлів БСМ з ТА. Крім цього ці протоколи не мають механізмів зменшення витрат енергії вузлами мережі.

Тому вдосконалення існуючих протоколів канального рівня БСМ з ТА для забезпечення гарантії передачі даних з сенсорних вузлів до ТА при зменшенні витрат енергії їх батарей є актуальною науковою задачею.

3.1 Траєкторна модель передачі даних між ТА і вузлами кластера

В порівнянні с технологіями Bluetooth (802.15.1) та ZigBee (802.15.4), використання в БСМ з ТА стандарту IEEE 802.11 прийнятне через більшу швидкість передачі (в два и три рази відповідно), більшу дальність передачі, меншу складність протоколу MAC-рівня, менше значення витрат енергії на обсяг переданих даних [62, 68].

В деяких версіях протоколу IEEE 802.11 вже визначений механізм пріоритету передачі [62], але він не враховує мобільність ТА. В нашому випадку пріоритет передачі вузла повинен бути пов'язаний з траєкторію переміщення ТА, а не тільки з кількістю повідомлень для передачі. Крім цього алгоритм передачі повинен враховувати факт наявності ТА в зоні радіозв'язності (повинна зберігатися енергія вузлів), так як в класичному алгоритмі 802.11, якщо отримувач не знаходиться в межах дії передавача, вузол скидає пакети (енергія витрачається даром).

Модель мережі. ТА виконує роль головного вузла кластерів мережі та виконує тимчасову кластеризацію сенсорних вузлів (згідно визначених в розділі 2 алгоритмів), які випадково розміщені на території моніторингу, та рухається по визначеній траєкторії обльоту кластера.

Можливо запропонувати різні варіанти руху ТА в кластері:

з постійною швидкістю без гарантії збору даних зі всіх вузлів в кластері – ймовірність обслуговування буде залежити від розташування вузлів, обсягу даних, швидкості передачі в каналі та протоколу доступу до каналу;

зі змінною швидкістю з гарантією забезпечення якості обслуговування вузлів – ТА повинен адаптувати свою швидкість польоту для збору даних зі всіх вузлів.

Вибір швидкості польоту ТА обмежується технічними можливостями польоту летального апарату та залежить від необхідного часу передачі даних, який визначається відстанню між вузлами і ТА, кількістю та щільністю розташування вузлів, обсягами даних моніторингу, прийнятими протоколами фізичного та канального рівнів моделі OSI.

Час збору даних при відомому обсязі даних в основному визначається швидкістю передачі в радіоканалі, яка залежить від відношення сигнал/шум (відстані, потужності передачі, протоколу обміну, характеристик антени тощо).

Тому необхідно управляти траєкторією (положенням) і швидкістю переміщення ТА, визначаючи інтервали тривалості обміну і потужності передач для кожного вузла. При повільному переміщенні ТА вузлу надано більше часу на обмін даними. Вузол може почекати, поки ТА наблизиться до нього, щоб почати передачу, тим самим заощаджуючи енергію. Однак, при переміщенні ТА наблизатиметься і до інших вузлів. Це призводить до того, що вузли будуть конкурувати за часові інтервали для передачі даних. Тоді вузли з великим ресурсом енергії батарей можуть передавати дані з більшої відстані, в той час як вузли з малим запасом енергії повинні чекати, поки ТА виявиться поруч. Це вимагає додаткового планування розкладу передач вузлів до ТА, що враховують час передачі (швидкість польоту, відстань, протокол доступу тощо) і енергію, необхідну на її доставку для оптимізації різних цільових функцій управління мережею.

Для реалізації пріоритетного обслуговування вузлів, що знаходяться на більшій відстані від ТА, пропонується за аналогією з децентралізованим режимом роботи протоколу IEEE 802.11 DCF ввести розіграш інтервалу виходу на передачу $t_{впmin} \leq t_{вп} \leq t_{впmax}$ залежно від відстані між вузлом і траєкторією переміщення ТА, наявної енергії батарей сенсорних вузлів. Якщо ТА почне обмін з першим вузлом, наближеним до лівої межі зони обслуговування, кількість обслужених вузлів буде більшою, ніж якщо почати обслуговування з крайнього правого вузла, так як

частина вузлів покине зону обслуговування (рис. 3.1) [19]. Таким чином, кількість обслугованих вузлів залежить від часу їх перебування в області, тобто від їх енергетичного стану та черговості обслуговування.

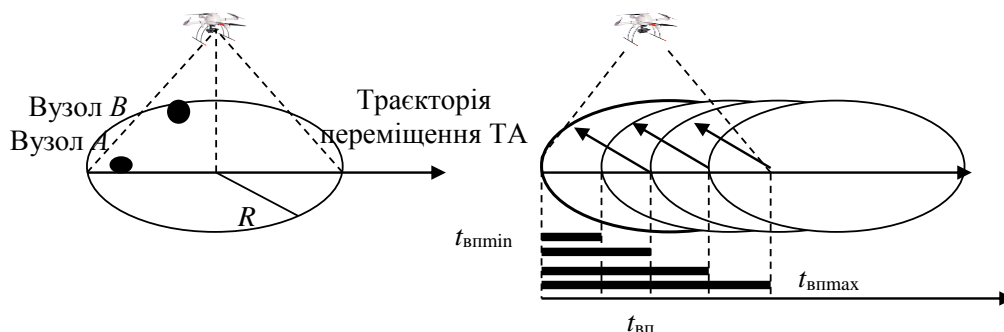


Рисунок 3.1 – Ілюстрація граничних значень початку та кінця передач вузла

При децентралізованому режимі роботи кластера рішення на передачу приймає сенсорний вузол. Послідовність доступу вузлів до каналу при використанні протоколу IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) визначається за рахунок динамічної зміни розміру вікна змагань $cw_{\min} < cw < cw_{\max}$ ($cw_{\min} = 32$, $cw_{\max} = 1024$). Після зайнятості середовища вузол очікує період DIFS і вступає в період змагань (рис. 3.2). Час відстрочки передачі $t_{\text{вп}}$ (backoff_interval) вибирається в межах вікна змагань B , який вимірюється в слотах і визначається

$$t_{\text{вп}} = \text{rand}[0; 2^r cw_{\min}] t_{\text{сл}}, 0 \leq r \leq m, \quad (3.1)$$

де $t_{\text{сл}}$ – тривалість слоту вікна змагань, rand – випадкове число, яке вибране з рівною ймовірністю в інтервалі $[0; cw_{\min} \cdot 2^r]$, $[x]$ – найбільш ціле, яке менше або дорівнює x , r і m – пріоритет передачі, $0 \leq r \leq m$, $r = f(R)$, R – відстань між вузлом і ТА (більша відстань – менший час відстрочки).

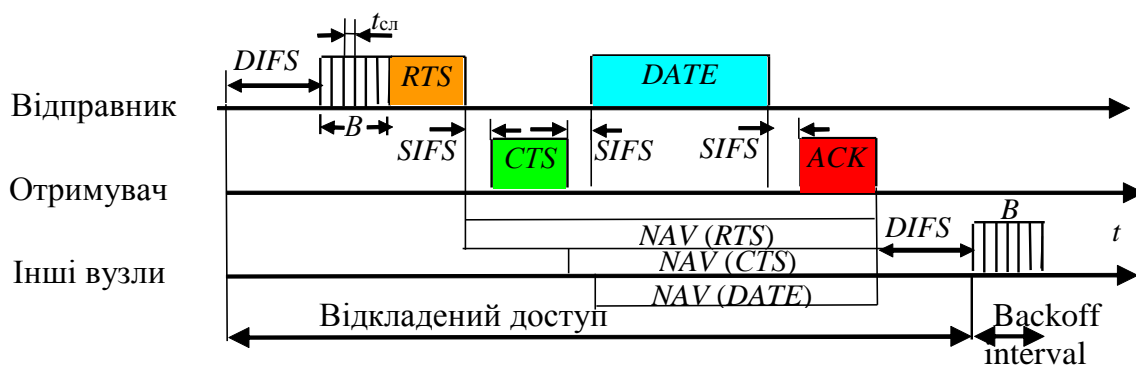


Рисунок 3.2 – Функціонування протоколу IEEE 802.11 в режимі DCF

Ефективність режиму DCF висока при низькій завантаженості мережі, проте пропускна здатність даного режиму істотно падає при збільшенні кількості вузлів і рівня завантаження, що пов'язано з високою ймовірністю зіткнень і збільшенням часу відстрочки. Проведені експерименти з протоколом 802.11 показують, що вузол, який здійснює інтенсивну передачу трафіка, здатний фактично захопити весь канал, оскільки процедура CSMA/CA, практично, декларує правило „першим прийшов – першим обслужений” [71]. Ця обставина сильно впливає на якість обслуговування трафіка та його детермінованість.

Тому для виконання завдання потрібно визначити таку черговість обслуговування вузлів, при якій було б обслужено їх максимальну кількість. Це завдання можна вирішити, звівши його до задачі про призначення [80]. Її рішення вимагає часу – обчислювальна складність $O(n^3)$, що в реальній ситуації (для реального числа вузлів в зоні обслуговування) цілком допустимо. Для цього пропонується вдосконалити централізований режим роботи 802.11 PCF – рішення приймає ТА. В залежності від розташування сенсорних вузлів та траєкторії переміщення ТА проводиться оптимізація розподілу порядку та часу обслуговування кожного вузла кластера.

Режим PCF (Point Coordination Function) дозволяє вирішити проблеми DCF, так як він працює в умовах відсутності конкуренції, що дозволяє забезпечити більш високий рівень пропускної здатності. У режимі PCF тільки вузол-координатор управляє доступом до каналу – використовується механізм доступу TDMA (Time Division Multiple Access). В режимі PCF координатор (в нас ТА) складає список опитування, згідно з яким циклічно опитує зареєстровані вузли на предмет отримання даних (рис. 3.3). На кожен вузол виділяється розрахований проміжок часу, після закінчення якого проводиться опитування наступного вузла. Жоден вузол не може передавати в цей час, за винятком того, що опитується. Оскільки PCF дає можливість кожному вузлу передавати певний час, даний механізм гарантує мінімальну затримку передачі. Для того щоб дати можливість новим вузлам зареєструватися в мережі, вузол-координатор періодично на короткий час

переходить в режим DCF, дозволяючи в цей період всім вузлам конкурувати за середовище.

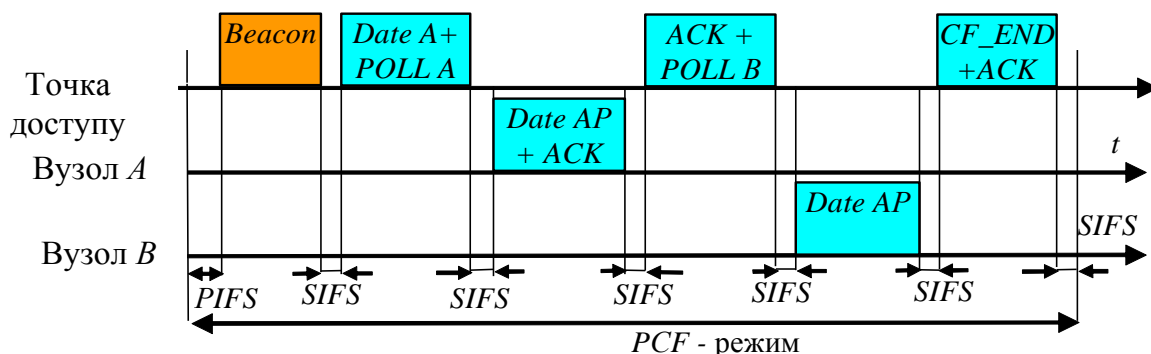


Рисунок 3.3 – Централізований режим роботи PCF протоколу 802.11

Для гарантованого розподілу трафіка між декількома вузлами необхідний спеціальний алгоритм роботи вузла-координатора (в даному випадку ТА). У найпростішому випадку список опитування статичний, опитуються всі зареєстровані вузли, кожному з них, при цьому, виділяється однаковий фіксований проміжок часу для передачі. Тому необхідний алгоритм адаптивного динамічного опиту (polling) для адаптації списку опитування. Адаптивні властивості даного алгоритму полягають в тому, що для розрахунку часових відрізків для кожного вузла він здійснює аналіз множини параметрів: число активних вузлів, інтенсивність передачі трафіка кожним вузлом в даний час і в минулому, кількість помилок, різновид трафіка тощо. При цьому список опитування формується в кожному циклі PCF динамічно, тобто „на льоту”.

Припустимо, що сенсорні вузли і ТА мають MAC-адреси, оснащені системою позиціонування. Пропонується гібридний (децентралізований/ централізований) протокол обміну даними між вузлами кластера та телекомунікаційною аероплатформою, який складається з чотирьох основних етапів: ініціалізація обміну ТА з сенсорними вузлами, передача вузлами кластера запитів на обмін з ТА (децентралізовано), планування передач сенсорних вузлів телекомунікаційною аероплатформою (централізовано), обмін даними моніторингу [19].

1. Ініціалізація обміну.

ТА під час польоту періодично широкомовно передає службове повідомлення про свою присутність (ПП), яке включає наступну інформацію: MAC-адреса, координати положення ТА, швидкість та висота польоту, напрямок переміщення, початкова та кінцева точка польоту (рис. 3.4). Вузли, які знаходяться в зоні радіозв'язності з ТА, приймають ПП та переходять в активний режим (за замовчуванням сенсорні вузли знаходяться в режимі сон (очікування) з метою збереження енергії за рахунок зменшення потужності споживання). Якщо сенсорний вузол не має даних для відправки, він повертається в режим сон, інакше він розраховує час початку передачі запиту на обмін.

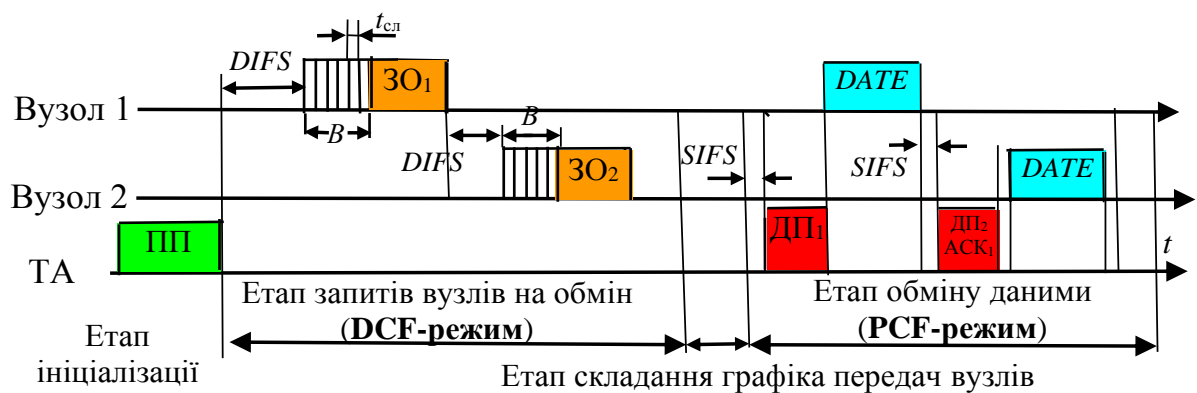


Рисунок 3.4 – Функціонування запропонованого гібридного протоколу

2. *Передача запитів на обмін вузлами кластера до ТА за визначеним пріоритетом (децентралізовано вузлами кластера).*

Якщо сенсорний вузол прийняв повідомлення про присутність від ТА, він стає активним та розраховує час початку передачі запиту на обмін згідно виразу (3.1). В визначений час вузол виходить на передачу та передає запит на обмін (3O) з ТА з інформацією про свій стан: координати, енергію батарей та зібраний об'єм даних моніторингу.

Пропонується за аналогією з децентралізованим режимом роботи протоколу IEEE 802.11DCF ввести розіграш між вузлами інтервалу виходу на передачу запиту ($t_{вп}$) залежно від відстані між вузлом і траєкторією переміщення ТА. Пропонується надавати пріоритет в обслуговуванні в кластері C вузлам, які знаходяться на найбільшій відстані від маршруту польоту.

Обсяг запиту на обмін дуже малий в порівнянні з обсягом даних моніторингу, крім цього виключається обмін RTS/CTS повідомленнями (які присутні в протоколі 802.11) для зменшення службового трафіку. Тому ймовірність колізій запитів на обмін дуже мала. При наявності колізії запиту вузол проводить повторний розіграш початку передачі.

3. Планування ТА графіка передач вузлами кластера (централізовано).

Після обробки прийнятих запитів на обмін від вузлів кластера ТА опрацьовує графік (пріоритет) передач вузлів в кластері (послідовність часових інтервалів $\Delta t_{\text{пері}}$ для кожного i -го вузла кластера, які пов'язані з інтервалом польоту $\Delta t_{\text{полі}} = t_{\text{нполі}} - t_{\text{кполі}}$ та місцеположенням ТА на траєкторії польоту) та послідовно передає повідомлення про дозвіл на передачу (ДП) даних кожному вузлу кластера. Графік передач складається відповідно наступних вихідних даних відносно кожного вузла: обсяг даних моніторингу, положення вузла і ТА в кластері; відстань до вузла та рівень сигналу від нього (визначає швидкість передачі даних в радіоканалі та витрати енергії вузла), розміри кластера, рівень енергії батареї, час передачі, розташування вузла відносно траєкторії польоту.

Пріоритет передачі вузлів в кластері ТА буде визначатися на основі ієрархії цільових функцій управління за наступними правилами, які можуть змінити швидкість, висоту та маршрут переміщення ТА в кластері (спочатку польоту в кластері швидкість ТА постійна $v = \text{const}$, висота польоту $h = \text{const}$).

Якщо, пріоритет цільової функції мінімум (задоволення) часу збору даних, то застосовуються наступні правила адаптації швидкості для задоволення або зменшення часу передачі:

Правило 1: ЯКЩО $t_{\text{пері}} \leq \Delta t_{\text{полі}}$, для $\forall i \in C$ – час передач всіх вузлів кластера C менший або рівний часу польоту над кожним вузлом, ТОДІ швидкість польоту ТА v не змінювати (або її збільшити до граничного значення відповідно виразу (3.2) для мінімізації часу польоту та відповідно збору даних) (рис. 2.10):

$$v \leq 2 \sqrt{d_{\text{max}}^2 - h^2} \cos \alpha \cdot s(d_{j\text{ТА}}, \Pi_{\text{ку}}) / V_{\text{дм}j}, \quad (3.2)$$

де $0 < d \leq d_{\text{max}}$ – відстань, $0 \leq v \leq v_{\text{max}}$, $V_{\text{дм}j} \leq V_{\text{дмmax}}$ – обсяг даних моніторингу.

Правило 2: ЯКЩО $t_{\text{пер}i} > \Delta t_{\text{пол}i}$ – час передачі i -го вузла більший від часу польоту над вузлом.

ЯКЩО не потрібно гарантувати збір даних моніторингу зі всіх вузлів, а цільова функція управління – мінімізація часу збору даних, ТОДІ не надавати вузлу дозвіл на передачу.

ЯКЩО потрібна гарантія збору даних з кожного вузла, ТОДІ ТА обрахувати та зменшити швидкість польоту для задоволення виразу (3.2).

Визначимо правила на зменшення енергії вузлів (цільова функція $T_{\phi} \rightarrow \min$), яка витрачається на передачу або перерозподіл витрат енергії (більша наявна енергія батареї вузла \rightarrow більша витрата) між вузлами при передачі даних до ТА для збільшення часу функціонування мережі:

ПРАВИЛО 3: планувати початок та кінець інтервалу обміну на найближчій відстані між вузлом-ТА, наприклад, на рис. 3.5 для вузлів b та c інтервали обміну сплановані на мінімальній відстані з ТА.

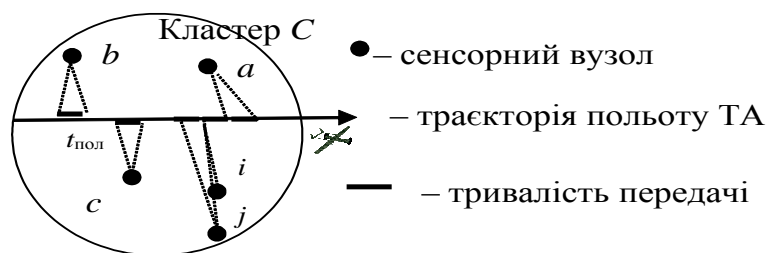


Рисунок 3.5 – Визначення інтервалу передачі в залежності від відстані та наявної енергії батарей вузлів

ПРАВИЛО 4: надавати пріоритет в обслуговуванні в кластері C вузлам з мінімальною енергією батарей – на найближчій відстані між вузлом та маршрутом переміщення ТА планувати $\Delta t_{\text{пол}i}$, тобто пріоритет $i > j > a$, якщо $e_i < e_j < e_a$, $i, j, a \in C$.

ПРАВИЛО 5: змінити маршрут та/або висоту польоту для задоволення вузлів з критичною енергією батареї, після цього ТА починає передавати ПП зі зміненими значеннями стану та проводить перепланування передачі.

4. Обмін даними (за дозволом ТА).

Коли вузол отримує повідомлення про дозвіл на передачу від ТА, він перевіряє MAC-адресу поля зі своїм MAC-адресом. Якщо адреса відповідає його MAC-адресі, він починає надсилати дані моніторингу ТА, якщо ні – він відкладає передачу. При прийомі визначеної кількості пакетів, ТА відправляє квитанцію вузлу та згідно визначеного графіка передач надсилає пакет ДП наступному вузлу кластера. Після передачі даних моніторингу вузол переключається в режим сон та періодично вмикається (режим очікування) для перевірки наявності повідомлень присутності ТА.

Проведено моделювання процесу обміну в мережі в середовищі MATLAB для запропонованого алгоритму в порівнянні з 802.11 за наступними параметрами моделювання: 200 статичних випадково розміщених вузлів на площі моніторингу 500 на 500 м, кількість ТА – 1, швидкість польоту – 15 м/с, висота – 20 м, дальність радіопередачі 200...250 м; початкова енергія вузла – 2J; енергія, яка витрачається на передачу пакету – 17.1 nJ, на прийом – 15 nJ, очікування – 12.7nJ, моніторинг – 2.7nJ, розмір пакету моніторингу – 100...150 байт, пакету запиту на передачу – 20 байт показало ефективність запропонованого методу.

На рис. 3.6 наведені отримані залежності кількості вузлів, які вийшли з ладу, від кількості раундів обльоту ТА, на рис. 3.7 – середні витрати енергії при різній кількості вузлів в кластері, на рис. 3.8 – середня затримка передачі від кількості вузлів в кластері при застосуванні різних протоколів доступу: IEEE 802.11, протокол пріоритетного доступу PFSC-MAC [76] та запропонованого гібридного протоколу при застосуванні різних правил досягнення цільових функцій управління.

В результаті моделювання доведено, що по-перше, запропонована модель дозволяє забезпечити збір даних зі всіх вузлів кластерів сенсорної мережі. По-друге, її застосування дозволяє в середньому на 10 – 15% збільшити час функціонування БСМ. Це пояснюється тим, що в запропонованому гібридному протоколі вузлам не потрібно залишатися активними протягом тривалого часу для передачі даних, а також ефективним використанням радіоканалу (менше колізій та службового трафіку).

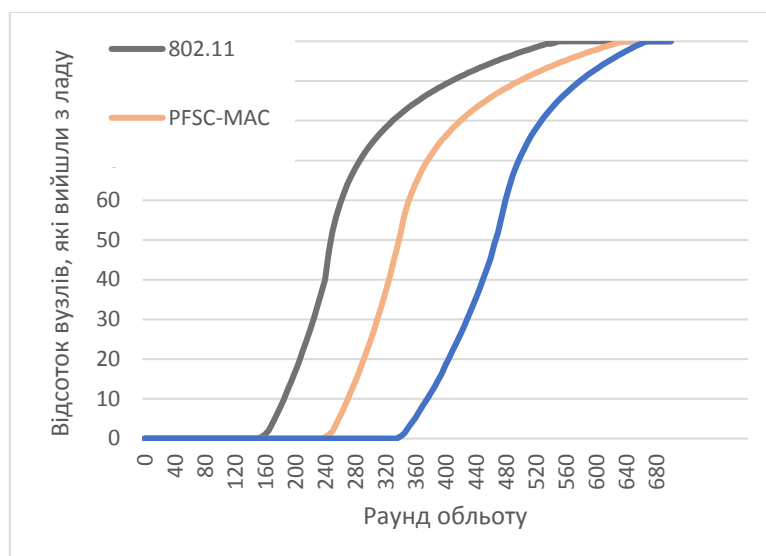


Рис. 3.6 – Залежність % вузлів, які вийшли з ладу від кількості раундів об'їзду ТА

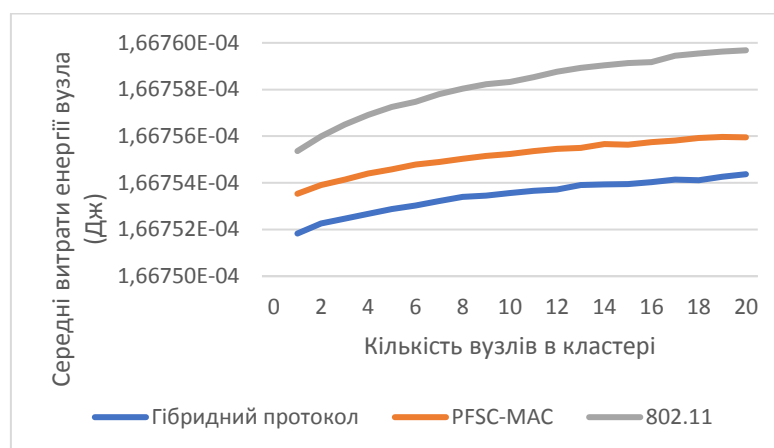


Рисунок 3.7 – Залежність середніх витрат енергії вузла від кількості вузлів в кластері

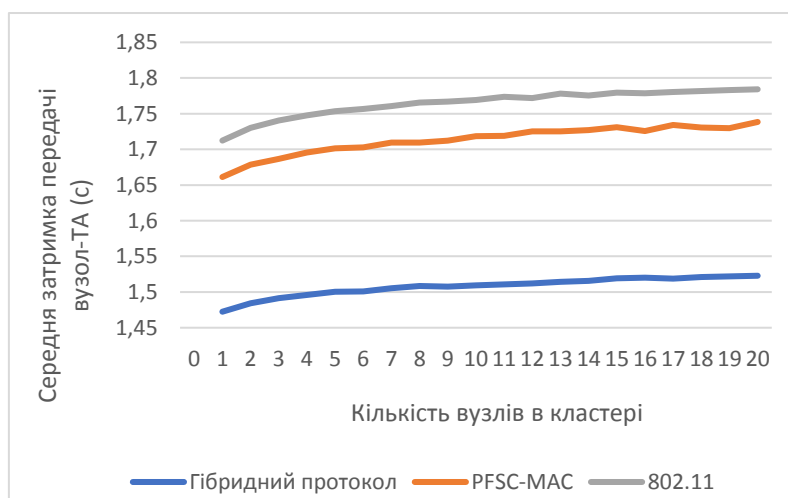


Рисунок 3.8 – Залежність середньої затримки передачі від кількості вузлів в кластері

3.2 Позиційна модель передачі даних між ТА і вузлами кластера

Час збору даних в кластері крім інших параметрів значною мірою залежить від пропускної здатності радіоканалів вузол-ТА та об'єму даних моніторингу. Для підвищення пропускної здатності кластера (відповідно зменшення часу збору даних моніторингу) пропонується нова позиційна модель обміну даними між ТА і вузлами кластера, яка враховує можливості сучасних протоколів обміну в радіоканалі збільшувати швидкість передачі шляхом зменшення відстані між ТА і вузлом (п. 2.4.1). Основна ідея визначається в наступному – необхідно знайти таке положення ТА у просторі над вузлами кластера (вирішальне правило – зменшити відстань між ТА з навантаженим вузлом), яке дозволить максимізувати сумарну пропускну здатність радіоканалів між вузлами і ТА [24, 25].

Це завдання просто вирішується для одного вузла, але стає складним для множини вузлів у кластері. Швидкість передачі ТА визначається сумою швидкостей передачі в радіоканалах вузлів які знаходяться в зоні покриття цієї ТА

$$s_{TA} = \sum_{i=1}^n s_{i-TA} (P_{MAC}, d_{i-TA}).$$

Швидкість передачі в радіоканалі s_{i-TA} значною мірою залежить від відстані d між вузлом і ТА, прийнятого MAC-протоколу (P_{MAC}). В протоколі 802.11 канална швидкість залежить від швидкості фізичного рівня та розміру фрейма. Будемо вважати в подальшому один фрейм одиницею передачі.

При реалізації протоколу 802.11 ТА буде намагатися рівномірно розподіляти слоти для кожного вузла зони покриття. Однак в реальності кожен вузол знаходиться на різних відстанях від ТА. Тому вузли, які знаходяться на більшій відстані від ТА, будуть реалізовувати менші значення швидкості передачі. Тому, змінюючи положення ТА у просторі, ми можемо регулювати сумарну швидкість передачі ТА – s_{TA} . Час передачі 1-го вузла $t_{1пер} = V_{дм1}/s_{1П}(d_1)$, час передачі 2-го вузла $t_{1пер} = V_{дм2}/s_{2П}(d_2)$, де $V_{дм}$ – обсяг даних моніторингу, w – положення ТА у просторі (точки A, B, C), s – швидкість передачі в радіоканалі, d – відстань між вузлом і ТА (рис. 3.9). Час передачі в кластері $t_{перкл} = t_{1пер} + t_{1пер}$.

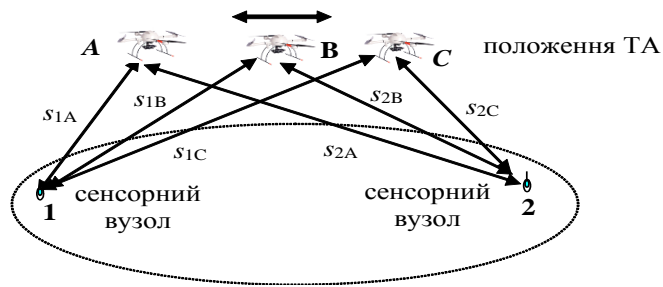


Рисунок 3.9 – Можливі положення ТА у просторі

Завдання ставиться наступним чином [19, 24, 25, 35, 53, 59]: знайти положення ТА w^* в кластері з n наземними вузлами, яке мінімізує час збору даних в кластері (вираз 3.3) або забезпечує мінімум витрат енергії вузлів кластера $E_{\text{кл}}$ при відомих обсягах даних моніторингу кожного i -го вузла $V_{i\text{мон}}$ та обсягу службового трафіка $V_{i\text{ст}}$

$$t_{\text{зб}} = \min \sum_i^n \frac{V_{i\text{мон}} + V_{i\text{ст}}}{s_i(d_{i-\text{ТА}})}, \quad (3.3)$$

$$E_{\text{кл}} = \min \sum_i^n e_i(d_{i-\text{ТА}})(V_{i\text{мон}} + V_{i\text{ст}}), \quad (3.4)$$

при обмеженнях на висоту ТА – $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$, зону можливого переміщення $\Theta_{\text{мп}} \in \Theta$, значення швидкостей передачі радіоканалів при різних відстанях $s_i(d_{i-\text{ТА}})$ (визначається характеристиками MAC-протоколу – табл. 2.2, табл. 2.3 розділ 2), значень витрат енергії вузлів (табл. 2.4), $\forall i \in \Theta, i = 1 \dots n$. При відомій висоті польоту h та куту спрямованості антени γ можна визначити радіус $R_{\text{пер}}$ кола можливого переміщення ТА, при який всі вузли будуть покриватися цим ТА : $R_{\text{пер}} = R_{\text{пок}} - d_{00j}$, $\forall j \in \Theta$ (рис. 3.10) .

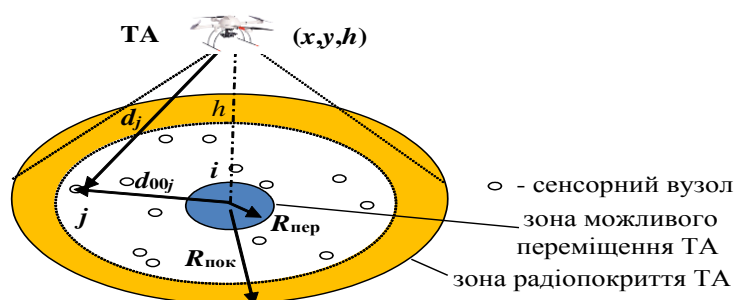


Рисунок 3.10 – Кластер та зона можливого переміщення ТА

Цільова функція в виразі (3.3) є невивпуклою та може мати локальні максимуми. Відомі методи рішення мають значну обчислювальну складність. Тому пропонується використати ітераційний алгоритм для обчислення наближеного значення координат (положення) ТА, яке намагається мінімізувати час збору даних. Цей алгоритм розраховує час збору даних в визначених положеннях ТА всередині кола можливого переміщення і вибирає позицію, яка має мінімум часу збору даних.

Алгоритм включає наступні кроки:

1. Розрахувати коло допустимого переміщення ТА.
2. Визначити множину можливих місць розміщення ТА в середині кола переміщення у вигляді сітки точок.
3. Розрахувати час збору даних зони у кожній точці сітки.
4. Вибрати точку решітки з мінімальним часом збору.

Враховуючи, що практично неможливо оцінити положення ТА всередині кола переміщення, яке містить безліч точок, визначимо сітку точок всередині кола, як показано на рис. 3.10. Для досягнення заданої точності обчислень крок сітки можна регулювати.

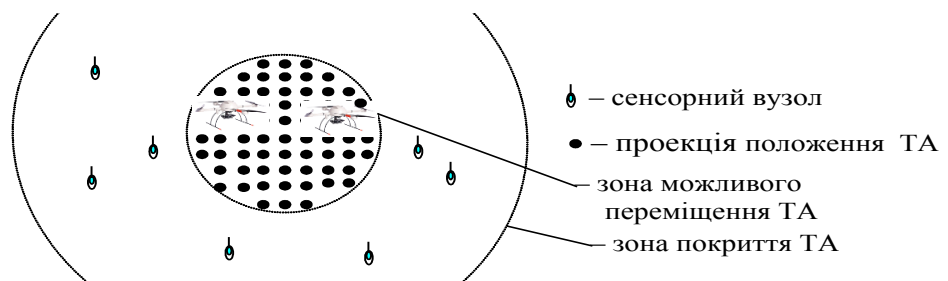


Рисунок 3.11 – Можливі положення ТА в зоні його переміщення

Обчислювальна складність алгоритму розрахунку часу збору даних – $O(n_t)$.

Для оцінки ефективності запропонованої моделі була здійснена програмна реалізація моделі. В реальності вузли навколо ТА розподілені нерівномірно. Тому були проведені дослідження нерівномірності в щільності розміщення вузлів: місцезнаходження 50 % вузлів в секторах з різними кутами (90, 120, 150, 180 градусів), а іншої частки вузлів розміщення у решті зони покриття. Зменшуючи кут знаходження вузлів, підвищується рівень нерівномірності розміщення вузлів і

навпаки. Проведено експерименти та визначені залежності зменшення часу збору даних (в %), витрат енергії (в %) запропонованої моделі відносно знаходження ТА в центрі мас кластера при зміні кількості вузлів в кластері при різних значеннях кута положення вузлів (рис. 3.12).

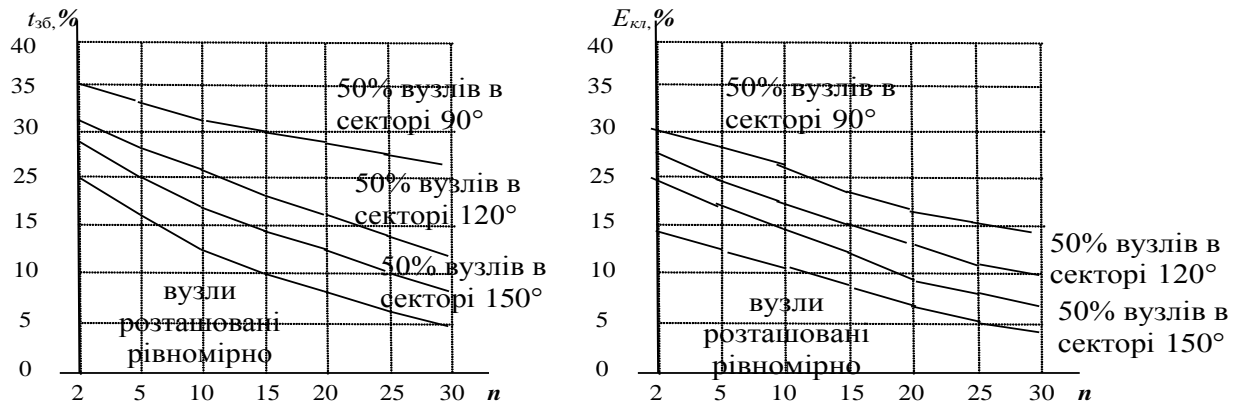


Рисунок 3.12 – Залежності зменшення t_{zb} , E_{kl} від кількості вузлів в кластері

Можна помітити, що вигрaш в зменшенні часу збору даних є значним при малій кількості вузлів в кластері та цей вигрaш зменшується при збільшенні кількості вузлів. Застосування моделі зменшує час збору до 30 % для двох вузлів і в середньому на 12 % – коли кількість вузлів в зоні дорівнює 30.

Вигрaш в зменшенні витрат енергії вузлів кластера (до 15%) значно більший при скупченні вузлів та менший при їх рівномірному розташуванні.

Висновки до 3 розділу

1. Аналіз існуючих МАС-протоколів, показав, що вони є недостатньо ефективними для збору даних з БСМ з використанням ТА, внаслідок обмеженого часу радіозв'язності, не визначення пріоритету обслуговування вузлів при переміщенні ТА, не врахування взаємного розташування вузлів і ТА.

2. Запропонована вдосконалена траєкторно-позиційна модель передачі даних між ТА і вузлами кластера, яка враховує взаємне розташування вузлів та їх стан відносно траєкторії та швидкості переміщення, положення телекомунікаційної аероплатформи в кластері.

3. Траєкторна модель застосовує гібридний спосіб обміну даними між вузлами кластера і ТА:

децентралізований спосіб – на етапі передачі вузлами запитів на обмін даними пріоритет передачі надається найбільш віддаленим вузлам від траєкторії ТА;

централізований – ТА розраховує та реалізує графік передач вузлів кластера в залежності від об'єму даних моніторингу, енергії батареї, відстані та траєкторію переміщення ТА для забезпечення гарантії обслуговування.

Запропоновані нові правила корегування траєкторій польоту ТА для досягнення певних цільових функцій управління мережею (вузол, який знаходиться далі від ТА отримує пріоритет в обслуговуванні, вузол, який володіє малою енергією батареї потребує обльоту ТА на близькій відстані (при задоволенні граничного часу збору даних)).

Результати моделювання показали, що запропонована модель має незначну обчислювальну складність, дозволяє забезпечити збір даних зі всіх вузлів сенсорної мережі з заданою якістю, на 10 – 13% збільшує час функціонування сенсорної мережі відносно існуючих протоколів обміну.

4. Запропонована позиційна модель передачі даних між ТА і вузлами кластера, яка визначає положення ТА у просторі в залежності від цільової функції управління, взаємного розташування вузлів та їх об'єму даних моніторингу з врахуванням можливостей зміни швидкості передачі МАС-протоколу. Представлений ітераційний алгоритм знаходження положення ТА у просторі. Результати моделювання показали, що застосування позиційної моделі дозволяє зменшити час збору даних кластера в середньому 12 % або знизити витрати енергії вузлів на прийомопередачу до 15%.

Основні результати розділу опубліковано автором у наукових працях: [19, 24, 25, 35, 53, 59].

РОЗДІЛ 4

ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ЗБОРУ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ З ГОЛОВНИХ ВУЗЛІВ КЛАСТЕРИЗОВАНОЇ БЕЗПРОВОДОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Розглядається метод збору інформації моніторингу ТА з вузлів БСМ, яка поділяється на кластери з формуванням головних вузлів кластерів (ГВК) [2, 7, 11 – 15, 20, 81 – 90]. Вузли самоорганізуються, будують та підтримують топологію кластера, маршрути передачі даних від вузлів-моніторингу до ГВК, які приймають та зберігають дані моніторингу вузлів свого кластера до підльоту ТА. ТА облітає ГВК (або вибирає іншу стратегію обльоту), які при встановленні радіозв'язності з ТА, передають йому дані моніторингу вузлів кластера. На рис. 4.1 наведені варіанти кластеризації мережі при застосуванні різних метрик вибору ГВК.

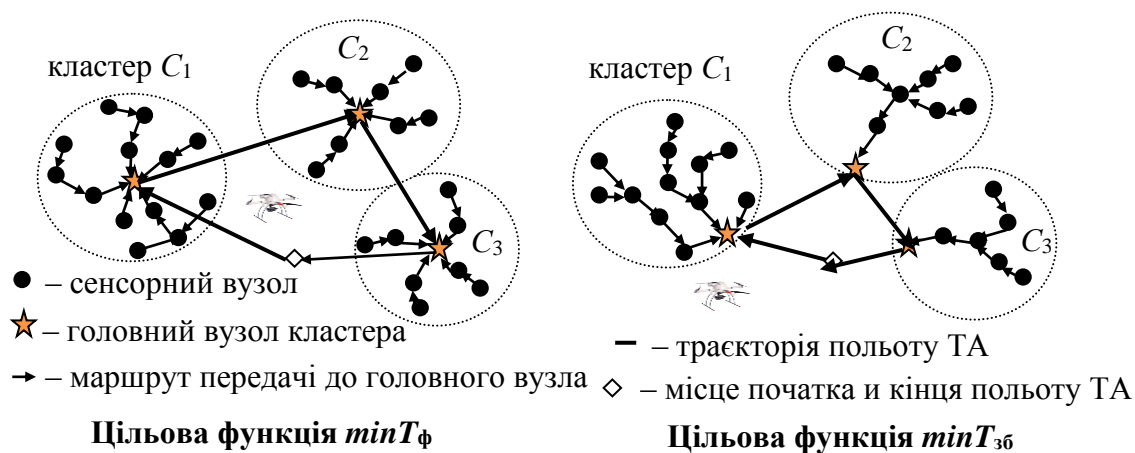


Рисунок 4.1 – Варіанти кластеризації мережі при різних цільових функціях управління

Перевагами цього методу в порівнянні з методом безпосереднього збору даних з вузлів БСМ ТА є: значне скорочення часу збору інформації моніторингу та менша кількість ТА, яка необхідна для збору даних. Однак цей метод потребує розробки та реалізації додаткових алгоритмів управління мережею, які підвищують

вимоги до апаратно-програмного забезпечення вузлів БСМ та додають додатковий службовий трафік. Цим завданням і присвячений цей розділ.

4.1 Постановка завдання

При синтезі методів збору інформації з головних вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами необхідно вирішити наступний ряд основних завдань (рис. 4.2):

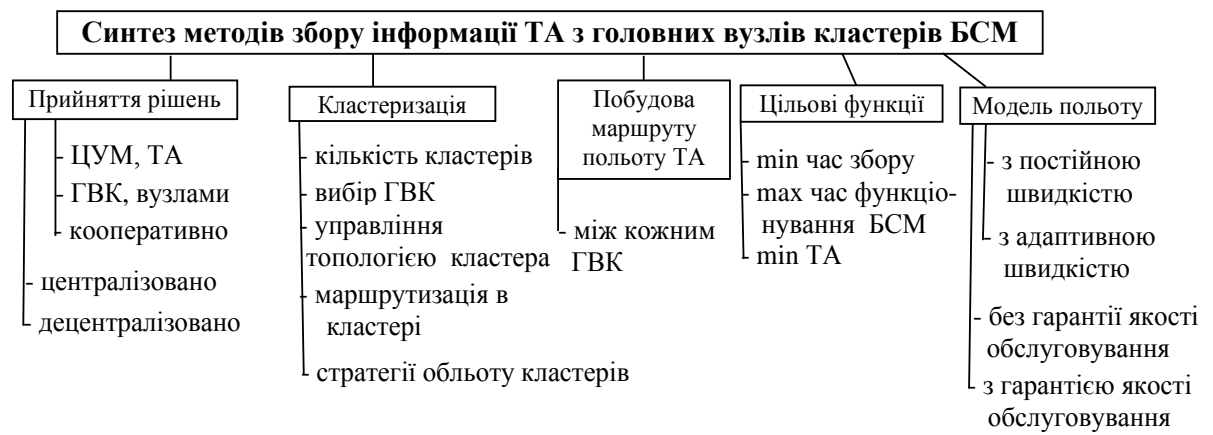


Рисунок 4.2 – Завдання синтезу методу збору даних ТА з головних вузлів БСМ

На етапі планування (проектування):

1. Прийняти рішення про порядок формування та підтримки кластерів в мережі. Це може відбуватись централізованим (ЦУМ, ТА), децентралізованим (самоорганізація вузлів) або змішаним способом. Зазвичай центр управління мережею розраховує початкове рішення по кластеризації мережі, а потім вузли самі підтримують кластери.

При цьому в БСМ необхідно визначити кількість кластерів, кількість вузлів в кластері та його діаметр. Від цього буде залежить час збору даних в кластері, обсяги трафіка моніторингу, який буде збиратись та зберігатись в головному вузлі, витрати енергії вузлів в кластері, кількість потрібних ТА тощо.

2. Визначити множину метрик та вирішальні правила вибору головного вузла в кластері. Пропонується пріоритет вибору тої чи іншої метрики визначати

пріоритетом цільової функції управління мережею, яку визначає замовник даних моніторингу.

3. Визначити вирішальні правила побудови топології кластера.

4. Визначити тип маршрутизації (табличний, зондовий, гібридний), метрики вибору маршруту тощо.

5. Визначити стратегії обльоту кластерів.

6. Визначити цільові функції при управлінні процесом збору даних, якими можуть бути: мінімізація часу збору даних, максимум часу функціонування БСМ, мінімум кількості ТА, мінімізація витрат енергії вузлів в процесі передачі від вузлів-моніторингу до головних вузлів, мінімум службового трафіку в кластері тощо.

7. Визначити модель польоту на основі знання або відсутності інформації про координати знаходження вузлів БСМ, з постійною або адаптивною швидкістю, з гарантією обслуговування або її відсутністю.

На етапі функціонування мережі потрібно:

1. Сформувати та підтримувати кластери (шляхом обміну службовими повідомлення між вузлами мережі). Після цього:

визначити головні вузли в кластері за відповідними значеннями та пріоритетами метрик вибору ГВК, вузли маршрутизатори, вузли моніторингу;

побудувати та підтримувати топологію в кластері, яка повинна бути орієнтована на реалізацію певних функцій управління мережею;

побудувати та підтримувати маршрути передачі від вузлів-моніторингу до головних вузлів при визначеній топології кластера.

2. Розрахувати стратегії та параметри польоту ТА в кластерах по заданих цільових функціях.

При наявності інформації про стан БСМ ці завдання вирішуються централізовано центром управління мережею (ЦУМ). При її відсутності – децентралізовано: ТА і вузлами мережі у взаємодії.

Основні цільові функції управління мережею аналогічні до розглянутих в другому розділі, однак кластеризація мережі вносить додаткові обмеження. Тобто

основними цільовими функціями управління є: мінімізація або обмеження часу збору даних (4.1), максимізація часу функціонування БСМ (4.2), мінімізація кількості ТА (4.3) та інші:

$$T_{зб} \rightarrow \min \text{ або } T_{зб} \leq T_{збзад}, \quad (4.1)$$

$$T_{\phi} \rightarrow \min \text{ або } T_{\phi} \leq T_{\phiзад}, \quad (4.2)$$

$$N_{ТА} \rightarrow \min \text{ або } N_{ТА} \leq N_{ТАзад}, \quad (4.3)$$

$$T_{зб} = L_{мб}/v; L_{мр} = f(n_{кл}, (x, y)_k, h, t_{обк}, St), k = 1 \dots n_k, \quad (4.4)$$

при обмеженнях Ω на: (4.5)

кількість вузлів БСМ $i = 1 \dots N$ та площу їх розміщення A ;

граничний час (відстань) польоту ТА – $T_{зб} \leq T_{полмак}$ ($0 < L_{мб} \leq L_{мр} \leq L_{ммак}$);

швидкість польоту ТА – $v = [v_{\min}, v_{\max}]$; кількість кластерів – $1 \leq n_{кл} \leq N$;

розмірність кластера та його максимальний діаметр;

енергію батарей вузлів і ТА – $e_i \leq e_{\max}$, $e_{ТА} \leq e_{ТАмак}$;

координати розташування $(x, y)_k$ вузлів k -го кластера, які повинні знаходитись в зоні радіозв'язності (мати зв'язність) з іншими вузлами кластера;

висоту польоту ТА – $h = [h_{\min}, h_{\max}]$, розмір буферу ТА – $V_{буф} \leq V_{буфмак}$;

розмір буферів головних вузлів кластерів повинен бути більше сумарного обсягу даних моніторингу всіх j -х вузлів кластера – $V_{буфгвк} \geq \sum_{j=1}^J V_{дм j}$;

час обльоту кожного k -го кластера ТА $t_{обк}$ повинен бути більшим ніж час передачі ГВК-ТА – $t_{обк} \geq t_{пергвк}$ при вимозі гарантованої якості обслуговування;

час збору даних головним вузлом кластера повинен бути завершеним до підльоту ТА.

4.2 Кластеризація вузлами безпроводової сенсорної мережі для збору даних ТА з головних вузлів кластерів

4.2.1 Аналіз існуючих алгоритмів кластеризації БСМ

Кластеризація є ключовим завданням для досягнення мінімізації витрат енергії вузлів і стабільності роботи мережі. Існує ряд алгоритмів кластеризації, спрямованих для поліпшення показників функціонування БСМ [80 – 87] (табл. 4.1):

скорочення витрат енергії вузлів, балансування навантаження, збільшення зв'язності, скорочення часу передачі даних, оптимізацію кількості кластерів тощо.

Алгоритм LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) запропонований одним з перших [81]. У ньому в кожному раунді кластеризації нові головні вузли кластера вибираються імовірнісним методом для отримання балансу навантаження, але без урахування енергії, що залишилася у вузлах. Пізніше авторами був запропонований алгоритм LEACH-C, який реалізує централізований метод управління процесом кластеризації за допомогою віддаленої базової станції. Кожен вузол відправляє інформацію про своє поточне місцезнаходження та енергетичний рівень на базову станцію, яка вирішує завдання вибору ГВК з високим рівнем енергії і намагається збалансувати навантаження.

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика алгоритмів кластеризації

Алгоритм	Складність	Тип шлюзу	Топологія кластера	Мета кластеризації
LEACH	$O(1)$	Статичний	Single-hop	Баланс навантаження
LEACH-C	$O(1)$	Статичний	Single-hop	Баланс навантаження / енергоефективність
EEHC	$O(kh)$	Статичний	Multi-hop	Енергоефективність
HEED	$O(1)$	Статичний	Single-hop	Баланс навантаження / енергоефективність
ExHEED	$O(1)$	Статичний	Single-hop	Баланс навантаження / енергоефективність / стабільність кластера
DWEHC	$O(1)$	Мобільний	Multi-hop	Енергоефективність / баланс навантаження
Fazackerley et	$O(1)$	Статичний	Single-hop	Статична енергоефективність
Pantziou et	$O(1)$	Мобільний	Multi-hop	Баланс навантаження

Алгоритм кластеризації EEHC (Energy Efficient Hierarchical Clustering) [83] формує багаторівневу кластерну топологію, яка забезпечує топологію всередині кластера топологію розміром k -стрибків і h -скачкову зв'язність між ГВК та

шлюзом. Вузли відправляють свої дані моніторингу з нижнього шару ГВК в верхній шар ГВК відповідно. Складність цього алгоритму – $O(k_1 + k_2 + \dots + k_n)$, що є значним недоліком у порівнянні з алгоритмами кластеризації складності $O(1)$.

Метою HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering) [84] алгоритму є вибір ГВК серед вузлів, що мають великі значення рівнів енергії батарей. Він вводить функцію вартості для розподіленого вибору ГВК. HEED спрямований на рішення 4-х основних цілей: збільшити час функціонування мережі, розподіляючи споживання енергії; завершити процес вибору ГВК за певну кількість ітерацій; мінімум службового трафіку і створення компактних кластерів. Хоча HEED є ефективним алгоритмом кластеризації, він має проблему, пов'язану з розміром кластерів. У разі зниження щільності мережі або дальності радіозв'язку деякі кластери формуються тільки у вигляді самого ГВК. Недоліки – це незбалансоване формування кластерів і збільшення споживання енергії.

Модифікований алгоритм HEED (ExHEED) пропонує зменшити споживання енергії за рахунок скорочення числа ГВК. Хоча ExHEED зменшує кількість одиничних ГВК в порівнянні з HEED, але він вводить додаткову затримку кластеризації і споживання енергії.

Алгоритм кластеризації DWEHC (Distributed Weight-based Energy-efficient Hierarchical Clustering) [85], намагається оптимізувати всередині кластерну топологію. Параметрами вибору кластера виступають потужність сигналу і близькість до сусідів. DWEHC формує добре збалансовані кластери з топологією з декількома ретрансляціями всередині. Для точного розрахунку відстані потрібні GPS-приймачі.

Fazackerley і ін. [86] запропонував алгоритм кластеризації на основі рівня сигналу (RSSI) для вибору ГВК в областях з високою щільністю. Кожен вузол конкурує, щоб стати ГВК з використанням значень RSSI, зібраних від сусідніх вузлів. Цей підхід зменшує дальність передачі, але не враховує залишкову енергію вузлів.

Pantziou і ін. [87] проведено аналіз ефективності збору даних з окремих міських сенсорних мереж за допомогою транспортних засобів громадського

користування в якості мобільного шлюзу, які рухаються по певній траєкторії через певні проміжки часу. Взаємодію між мобільним шлюзом і мережами пропонується здійснювати через вузли-рандеву. Залишкова енергія батарей і відстань до траєкторії використовуються в якості параметрів при виборі вузлів-рандеву.

Таким чином, на теперішній час запропоновано значну кількість алгоритмів кластеризації, однак вони не враховують особливості та обмеження, які накладають БСМ з ТА: мобільність шлюзу (час збору даних залежить від часу прольоту ТА), різна розмірність кластерів (тобто топологія кластера буде мати маршрути з декількома ретрансляціями типу multi-hop), необхідність реалізувати різні цільові функції управління БСМ при зборі даних тощо.

4.2.2 Метрики вибору головних вузлів кластерів

Алгоритм кластеризації визначає порядок: розбиття мережі на кластери, вибору головного вузла кластера, побудови топології і маршрутів передачі, збору інформації моніторингу та передачі її на ТА. Перевагами кластеризації над одноранговими мережами є: подовження часу функціонування мережі за рахунок планування поведінки вузлів в кластерах, зменшення розмірів маршрутних таблиць, агрегації даних моніторингу і зменшення їх надмірності головним вузлом кластера, спрощення процедури управління топологією, маршрутизацією тощо.

На відмінність від існуючих підходів до кластеризації пропонується використовувати множину метрик, яка враховує особливості збору даних з головних вузлів кластерів ТА.

Запропонований алгоритм кластеризації БСМ складається з трьох етапів:

- 1) створення кластера;
- 2) вибір головного вузла кластера;
- 3) оптимізація кластерів по топології та маршрутизації.

Створення кластера та вибір головних вузлів кластерів здійснюється шляхом обміну службовими повідомленнями між вузлами кластера, узгодження вибору головного вузла на підставі певних правил і метрик.

У порівнянні з відомими підходами кластеризації [81 – 87] для вибору головного вузла пропонується використовувати сукупність метрик [20, 44, 37]: рівень залишкової енергії батареї вузла за вирахуванням енергії, необхідної для виконання функцій головного вузла в кластері в наступному раунді обльоту ТА – μ_1 (розраховується за запропонованою в розділі 4.3 моделлю витрат енергії вузлів); потужність (витрати енергії) передачі – μ_2 ; кількість сусідніх вузлів – μ_3 ; географічні або відносні координати – μ_4 , відстань до ТА (рівень потужності сигналу з ТА) – μ_5 , кількість ретрансляцій від вузла до голови кластера – μ_6 .

На етапі планування збору даних пріоритет у виборі метрик при формуванні кластерів буде визначатися системою управління мережі на основі цільових функцій управління ($Z_y \rightarrow \mu_y$): для $\min T_{зб}$ – пріоритет μ_5 , для $\max T_{ф}$ – μ_1 , для $\min N_{ТА}$ – μ_6 (кластери більшого розміру) тощо.

Обсяг службового трафіка для кожного вузла $V_{сткл}$ при реалізації кластеризації дорівнює добутку кількості вузлів кластера $n_{вузкл}$, кількості ітерацій I для її реалізації, обсягу одиничного службового повідомлення $V_{спкл}$

$$V_{сткл} = n_{вузкл} I V_{спкл}.$$

Цей вираз враховується при розрахунку витрат енергії вузлами кластера (розділ 4.3). До процесу кластеризації пред'являються наступні вимоги: мінімальна кількість ітерацій I , завершення процесу до підльоту ТА.

Після формування кластера, отримана його початкова випадкова топологія підлягає оптимізації відповідно до цільових функцій управління. Зауважимо, що процес управління топологією передуює процесу маршрутизації і визначає потенційні можливості та якість майбутніх маршрутів. Кількість вузлів в кластері та його розмір (обраховується максимальною кількістю ретрансляцій (або відстанню) між вузлом кластера та головним вузлом кластера) буде визначати сумарний обсяг трафіка моніторингу, що генерує кожен вузол кластера та який повинен потім передаватися до ТА.

Пропускна здатність та час обміну між ГВК і ТА визначаються протоколом множинного доступу прийнятим до реалізації в мережі. Чим більша кількість вузлів в кластері, тим необхідна більша пропускна здатність протоколу каналного рівня.

Зменшення висоти польоту ТА спричинить до підвищення швидкості передачі в радіоканалі, однак призведе до збільшення маршруту та зменшення часу прольоту.

Загальний обсяг даних моніторингу в кластері – $V_{\text{дм}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{вузкл}}} V_{\text{дм}j}$.

Час передачі даних між ГВК і ТА повинен бути меншим за час прольоту ТА в черговому раунді обльоту

$$t_{\text{прГВК}} \geq t_{\text{перГВК-ТА}} = V_{\text{дмГВК}} / s(d, \Pi_{\text{ку}}), t_{\text{пер}j} = t_{\text{всзв}j} + t_{\text{оч}j} + t_{\text{бпер}j}.$$

Тому можливі дві стратегії якості обслуговування – гарантована якість або без гарантії (задається замовником).

1. Збір даних ТА з гарантією збору всього обсягу даних з ГВК.

а) Підліт ТА до кожного головного вузла кластера з мінімальною відстанню між ними: якщо відстань (висота) між ТА і ГВК зменшується, то витрати енергії ГВК і ТА також зменшуються, швидкість передачі в радіоканалі збільшується, відповідно, час передачі даних скорочується та час збору даних в цілому зменшується.

б) обліт БСМ ТА з радіопокриттям декількох головних вузлів кластерів (рис. 4.3) – здійснюється аналогічно методу збору даних з кластеризацією ТА (розділи 2, 3), в ролі вузлів збору даних виступають ГВК.

2. Збір певного обсягу даних з ГВК – якість не гарантована, ТА пролітає вздовж головного вузла кластера без адаптації швидкості польоту та швидкості передачі.

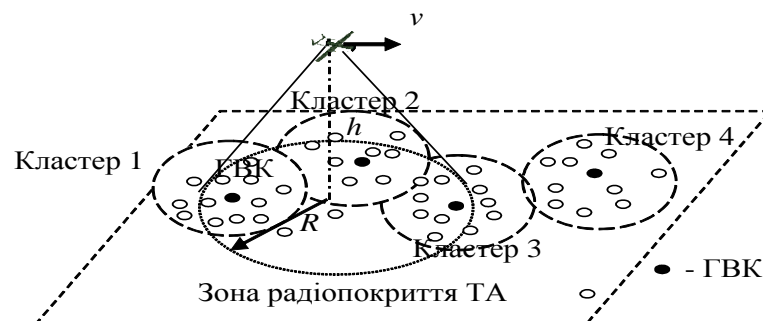


Рисунок 4.3 – Приклад збору даних ТА з трьох ГВК

4.3. Модель розрахунку витрат енергії вузлів мережі при використанні ТА для збору даних моніторингу

Зменшення кількості кластерів $n_{\text{кл}}$ в БСМ призводить до зменшення кількості ГВК, скорочення базового маршруту обльоту, але збільшує: розмір кластера за кількістю вузлів та площею; енергію, що витрачається кожним вузлом на побудову і підтримку топології та маршрутів передачі даних до ГВК; витрати енергії кожного ГВК на прийом і агрегування цих даних; витрати (енергетичні, часові, зв'язні) на створення і переформатування кластерів. На рис. 4.4 показані якісні залежності цих значень від різних рішень по кластеризації мережі, де $|C|$ – кількість кластерів в мережі, $L_{\text{м}}$ – довжина базового маршруту польоту ТА, $l_{\text{мар_кл}}$ – максимальна довжина маршруту передачі даних в кластері від вузлів-моніторингу до ГВК.

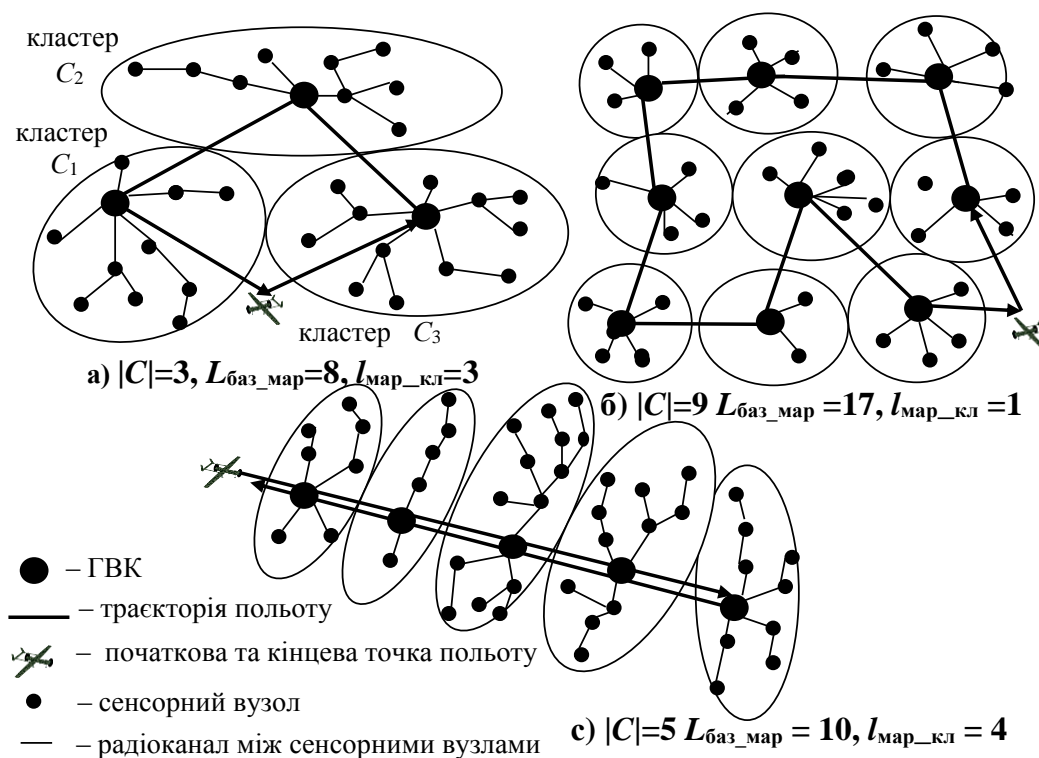


Рисунок 4.4 – Приклади кластеризації БСМ

Від вирішення завдання кластеризації залежить досягнення тих чи інших цільових функцій управління. При збільшенні кількості кластерів (і, відповідно, зменшенні кількості вузлів в кластері) – збільшується число точок (час) збору

даних, але зменшуються витрати енергії вузлів в кластерах на їх формування та передачу (маршрутизацію) даних моніторингу до головних вузлів. І навпаки. Для аналізу якості прийняття рішення по кластеризації, необхідна модель розрахунку витрат енергії вузлів мережі при конкретному прийнятті рішення по кластеризації.

Дано: всі сенсорні вузли однорідні, БСМ поділена на зв'язні кластери (відомі координати вузлів, топологія, маршрути передачі, початкова (існуюча) енергія батарей кожного вузла мережі, e_{i0} , $i=1\dots N$), в кожному раунді обльоту ТА визначені ГВК, відомі обсяги та інтенсивність збору інформації моніторингу вузлами в кластерах, заданий граничний час функціонування мережі $T_{\text{фзад}}$, який будемо визначати кількістю раундів обльоту $NR_{\text{зад}}$ при виконанні БСМ своїх функцій.

Необхідно: розрахувати середню споживану енергію i -м вузлом e_i за один раунд обльоту ТА при різних функціональних режимах роботи вузлів.

Рішення: кількість раундів обльоту мережі дорівнює $NR = e_{i0}/e_i$. Якщо $NR \leq NR_{\text{зад}}$, то БСМ задовольняє вимогам за часом функціонування і можна здійснювати оптимізацію за часом збору даних. Розглянемо детальніше модель.

Енергія вузла витрачається на такі основні режими його роботи: прийом, передача, моніторинг даних, сон: $e = e_{\text{пр}} + e_{\text{пер}} + e_{\text{мон}} + e_{\text{сон}}$.

Кожен вузол кластера може здійснювати обмін даними з сусідніми вузлами, з ТА (якщо він виконує функції головного вузла), виступати в ролі ретранслятора (маршрутизатора) при передачі даних в маршруті до ГВК, а також виконувати функції вузла-моніторингу. Загальний обсяг даних обміну складають: обсяг даних моніторингу $V_{\text{мон}i}$ кожного i -го вузла, переданого до головного вузла за побудованими маршрутами в кластері, та обсяг службових даних $V_{\text{сл}}$, визначених прийнятими алгоритмами (протоколами) обміну (кластеризації, маршрутизації, побудови топології тощо) на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем.

Розглянемо витрати енергії вузлів кластера, відповідно до функціоналу:

а). Енергія, що витрачається простим вузлом s на моніторинг об'єктів і передачу даних головному вузлу кластера через сусідній вузол j в маршруті до ГВК, режим сон:

$$e_{\text{спростий}} = e_{\text{смон}}(r_{\text{мон}}, t_{\text{мон}}) + e_{\text{перс}j} V_{\text{перс}} + e_{\text{пр}j} V_{\text{пр}} + e_{\text{сон}}(t_{\text{сон}}), e_{\text{перс}j} = \alpha + \beta r_{ij}^2, \quad (4.7)$$

де $e_{\text{пр}j}$ и $e_{\text{перс}j}$ – енергія, яка витрачається на біт прийому та передачі; $V_{\text{пер}}$, $V_{\text{пр}}$ – об'єми даних, що передаються та приймаються (з врахуванням обсягу моніторингу $V_{\text{мон}}$ та обсягу службового трафіку $V_{\text{ст}}$); α , β – коефіцієнти, r_{sj} – відстань між вузлами s и j ; $e_{\text{смон}}$ – енергія витрачається s -м вузлом за певний $t_{\text{мон}}$ час моніторингу; $r_{\text{мон}}$ – радіус моніторингу; $e_{\text{сон}}(t_{\text{сон}})$ – енергія, яка витрачається вузлом на режим сон.

б). Енергія, яка витрачається вузлом-ретранслятором в маршруті передачі від простого вузла джерела s даних до q -го ГВК: $s-\dots-j-i-b-\dots-q$:

$$e_{\text{іретр}} = e_{\text{іпростий}} + (e_{\text{пр}ij} V_{\text{мон}i} + e_{\text{пер}ij} V_{\text{пер}i} + e_{\text{пер}ib} V_{\text{мон}i} + e_{\text{пр}bi} V_{\text{пр}b}) n_{\text{вуз}i}, \quad (4.8)$$

де $n_{\text{вуз}i}$ – множина вузлів-джерел піддерева маршруту \mathfrak{Z} до головного вузла q через вузол i .

в). Енергія, яка витрачається q -м головним вузлом k -го кластера – $e_{q\text{ГВК}}$: прийом-передача даних з ТА; прийом даних моніторингу $V_{\text{мон}i}$ від усіх вузлів кластера через j -е вузли-сусіди та передача підтвердження вузлам сусідам; агрегування даних від всіх вузлів кластера; побудова кластерів, побудова топології, побудова маршрутів передачі (визначають обсяг службових повідомлень); сон:

$$e_{q\text{ГВК}} = e_{\text{пр}q\text{-ТА}} V_{\text{прТА}} + e_{\text{пер}q\text{-ТА}} n_{\text{вузкл}k} V_{\text{мон}i} + e_{\text{пр}qj} (n_{\text{вузкл}k} - 1) V_{\text{мон}i} + e_{\text{пер}qj} (n_{\text{вузкл}k} - 1) V_{\text{пер}ij} + \\ + e_{\text{агр}q} n_{\text{вузкл}k} V_{\text{мон}i} + e_{q\text{кластер}} + e_{q\text{топол}} + e_{q\text{марш}} + e_{q\text{мон}} + e_{q\text{сон}}, \quad (4.9)$$

де $e_{\text{пр}q\text{-ТА}}$ та $e_{\text{пер}q\text{-ТА}}$ – енергія, яка витрачається на біт при прийомі та передачі між q -м гооловним вузлом кластера і ТА, $e_{\text{агр}}$ – енергія, яка витрачається на агрегацію даних, $e_{\text{пр}qj}$, $e_{\text{пер}qj}$ – витрати енергії на прийом (передачу) ГВК інформації від (до) сусідніх сенсорів, $n_{\text{вузкл}k}$ – кількість вузлів в кластері, j – вузол-сусід вузла i ; $e_{q\text{топол}}$, $e_{q\text{марш}}$, $e_{q\text{кластер}}$, $e_{q\text{мон}}$, $e_{q\text{сон}}$ – енергія, яка витрачається на прийняття рішення та обмін даними на побудову кластера, топології, маршрутів передачі, моніторинг та сон.

Розглянемо алгоритм обчислення необхідної кількості кластерів в мережі.

Кількість і розмір кластерів впливає на час збору інформації ТА, витрати енергії батарей (час функціонування мережі), обсяг службового трафіка, затримку передачі в кластері тощо.

Пропонується ітераційний алгоритм знаходження допустимого рішення – необхідної кількості кластерів в мережі, що задовольняє цільовим функціям (4.1) та/або (4.2) [22]. Основна його ідея – якщо $n_{\text{кл}} \uparrow$, то $T_{\text{зб}} \uparrow$ и $T_{\text{ф}} \uparrow$ і навпаки. Ми намагаємося виконати обмеження (4.5) та отримати допустимі рішення.

Основні етапи алгоритму:

1. Вибирається початкове рішення за кількістю кластерів: $1 < n_{\text{кл}} < N$.
2. Обчислюється середнє число вузлів $n_{\text{вузкл}} = N/n_{\text{кл}}$ в кластері.
3. Проводиться кластеризація (згідно алгоритму кластерного аналізу k -середніх со значенням $k=n_{\text{кл}}$) і призначаються головні вузли кластерів (пріоритет метрик вибору ГВК визначається згідно пріоритету цільових функцій управління – розділ 4.2.2).
4. Будується топологія в кластерах і маршрути передачі в кластерах (згідно алгоритмів, які викладені в розділах 4.5 та 4.6).
5. Розраховується базовий найкоротший маршрут польоту ТА [7] з визначеною стратегією якості обслуговування і визначається висота польоту з урахуванням обмежень (розділ 2.5).
6. Обчислюється час збору даних з БСМ $T_{\text{зб}}$ відповідно до виразу (2.20).
7. Перевірка задоволення часу збору даних – $T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}$:
 ЯКЩО ($T_{\text{зб}} \leq T_{\text{полптах}}$ або $T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}$) та ($n_{\text{кл}}=1$), ТОДІ КІНЕЦЬ (рішення не має – не вистачає ресурсу ТА для збору даних за визначений час).
 ЯКЩО ($T_{\text{зб}} \leq T_{\text{полптах}}$ або $T_{\text{зб}} \leq T_{\text{збзад}}$) та (значення $n_{\text{кл}}$ отримано на попередніх кроках), ТОДІ фіксація допустимого рішення по $T_{\text{зб}}$, перехід до блоку 8.
 ЯКЩО ($T_{\text{зб}} \rightarrow \min$), ТОДІ $n_{\text{кл}} = n_{\text{кл}} - 1$ (ЯКЩО $n_{\text{кл}} = 0$ ТОДІ до кроку 10),
 перехід до кроку 2.
8. Обчислення середніх витрат енергії вузлів кожного кластера відповідно до розглянутої вище моделі (4.7) – (4.9). Обчислення кількості раундів NR функціонування кожного кластера та мережі в цілому.

9. Перевірка задоволення кількості раундів функціонування БСМ ($NR_{\text{зад}}$):

(ЯКЩО $NR \leq NR_{\text{зад}}$) та ($n_{\text{кл}}=1$), ТОДІ КІНЕЦЬ (БСМ не забезпечить заданий час функціонування);

ЯКЩО $NR > NR_{\text{зад}}$ ТОДІ фіксація допустимого рішення по NR ,

ЯКЩО ($NR \rightarrow \max$) ТОДІ $n_{\text{кл}} = n_{\text{кл}} + 1$ (ЯКЩО $n_{\text{кл}}=N$ ТОДІ до кроку 10),
перехід до кроку 2.

ЯКЩО $NR \leq NR_{\text{зад}}$ ТОДІ $n_{\text{кл}} = n_{\text{кл}} + 1$ (ЯКЩО $n_{\text{кл}}=N$ ТОДІ КІНЕЦЬ – застосувати метод безпосереднього збору даних з вузлів БСМ), перехід до кр. 2.

10. Вибір найкращого рішення з множини допустимих рішень згідно вимог цільової функції управління. КІНЕЦЬ.

Таким чином в результаті роботи алгоритму буде отримано допустиме або оптимальне рішення за певною цільовою функцією.

4.4 Алгоритм побудови топології кластерів БСМ

На даний час запропоновано ряд методів (протоколів), які використовуються для однорідних або неоднорідних безпроводових сенсорних (різні типи сенсорних вузлів) мереж (однаковий або різний радіус передачі) [29, 88 – 96]. Однак вони не розглядають особливості застосування ТА для збору даних моніторингу з БСМ.

Під топологією мережі розуміють сукупність вузлів на місцевості та радіоканалів, які їх з'єднують [96]. Топологія в кластері визначає потенційні можливості маршрутів по обміну даними між вузлами та ГВК. Кожний i -й вузол може змінювати потужність передачі p_i в певних межах. Збільшення p_i приводить до: збільшення витрат енергії на передачу вузла $e_{i\text{вит}}$, зменшення кількості ретрансляцій в маршруті (відповідно часу передачі $t_{\text{пер}}$), однак призводить до збільшення рівня взаємних завад між вузлами та зменшенню пропускної здатності кластера. І навпаки, зменшення p_i вузлів дозволяє зменшити $e_{i\text{вит}}$ (зростає час функціонування вузла та пропускна здатність кластера). Це призводить до збільшення довжини маршрутів (діаметра кластера) та, відповідно, до збільшення $t_{\text{пер}}$, а можливо поділу мережі на незв'язні підмережі.

Управління топологією будемо здійснювати за рахунок визначення потужностей передач вузлів з метою досягнення певних цільових функцій управління [96]: забезпечення зв'язності між вузлами-моніторингу та ГВК; мінімізація енергії на передачу-прийом вузлів кластера; виконання вимог до часу доставки повідомлень між звичайним вузлом та ГВК; задоволення вимог до пропускної здатності в маршрутах передачі між вузлами-моніторингу та ГВК тощо.

Тобто необхідно знайти матрицю зв'язності T^* кластера, яка забезпечить максимізацію часу функціонування кластера за рахунок зменшення потужностей передач вузлів

$$T^* = \arg \max_{U \in \Omega} T_{\Phi}(T), \quad (4.10)$$

$$\text{при обмеженнях } \Omega = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \Omega_3: \quad (4.11)$$

на множину керуючих впливів – $\Omega_1: \{p_i \leq p_{i\max}, t_{\text{клас}} \leq t_{\text{класдоп}}\}$,

ресурси кластера – $\Omega_2: \{e_{i\min} \leq e_i \leq e_{i\max}, g_{ij} \leq s_{ij}(c_{ij}), s_{ij}(c_{ij}) \geq s_{\min}, d_i \leq d_{i\max}\}$,

вимоги до параметрів інформаційного обміну в маршрутах передачі – Ω_3 :

$$\{t_{3б} \leq t_{\text{доп}} (l_{a\text{ГВК}} \leq l_{\text{доп}}); g_{ij} \leq s_{ij} \leq g_{\max}, s(m_{a\text{ГВК}}) \geq s_{\text{доп}}\},$$

де p_i – потужність передачі i -го вузла; $t_{\text{клас}}$ – час прийняття та реалізації рішень по кластеризації; $t_{3б}$ – час збору (передачі) даних між вузлом-моніторингу та ГВК, g_{ij} – інтенсивність генерації даних моніторингу за маршрутами $m_{a\text{ГВК}}$, які проходять скрізь канал $(i, j) \in m_{a\text{ГВК}}$ – маршрут відправником a та ГВК; s_{ij} – пропускна здатність радіоканалу; d_i – дальність передачі вузла; l – довжина маршруту.

Завдання управління топологією кластера зводиться до завдання ситуаційного управління. Загальний алгоритм процесу ситуаційного управління топологією головним вузлом кластера складається з наступних кроків (рис. 4.5).

1. Збір інформації ГВК про стан вузлів (початковий стан топології T^0). Здійснюється розповсюдженням службових зондів-запитів та отримання зондів-відповідей з інформацією про свій стан (координати, енергія батарей, потужність передачі, обсяг та інтенсивність даних моніторингу тощо) від вузлів кластера.

2. Перевірка ГВК параметрів функціонування кластера на відповідність вимогам інформаційного обміну (перевірка обмежень Ω_3). Якщо вони відповідають

вимогам, тоді перехід на пошук рішення по зменшенню витрат енергії вузлів (блок 4), інакше – всі варіанти перебрані, перехід на блок 8 і КІНЕЦЬ.

3. Пошук нової топології T_{k+1} відповідно до визначених правил.

4. Розрахунок параметрів функціонування кластера.

5. Якщо показники отриманої топології $\Pi(T_{k+1})$ кращі ніж $\Pi(T_k)$, то топологію залишити, якщо ні – перехід на крок 4 (пошук нової топології).

6. В випадку покращення, топологія (рішення) фіксується та перехід на блок 2, інакше – рішення відкидається, перехід на блок 4.

Завдання пошуку матриці зв'язності T^* (вираз 4.10) відноситься до класу NP-повних. Перебір всіх варіантів топологій та вибір оптимальної за певною цільовою функцією вимагає значного часу. Тому для спрямованого перебору варіантів топологій кластера пропонується реалізувати правила продукційного типу (блок 4): **ЯКЩО** <ситуація> **ТОДІ** <рішення> [96]. Критерієм визначення моменту перебудови топології є невиконання одного з обмежень Ω_3 (вираз 4.11).

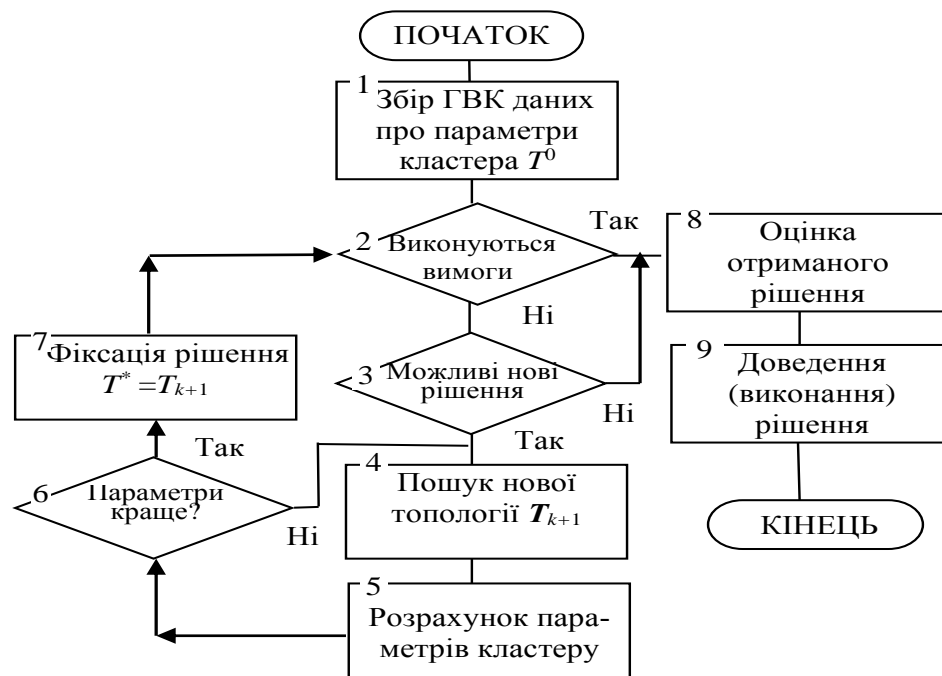


Рисунок 4.5 – Схема-алгоритм управління топологією в кластері

Всі правила збільшують або зменшують потужність передачі вузла, що призводить до збільшення або зменшення кількості вузлів, які приймають цю передачу, і, відповідно, перерозподіл трафіку та витрат енергії між вузлами та ін.

В роботах [93 – 95] доводиться, що граф RNG (Relative Neighborhood Graph) та граф Габріеля (GG, Gabriel Graph) володіють властивостями мінімізації потужності (енергії) передачі в мережі. Побудова RNG графу з вихідного G графу визначається наступними правилами: $\forall a \neq b, c: |cb| \leq \max(|ca|, |ba|)$ (рис. 4.6). GG-граф будується за наступним правилом: $\forall a \neq b, c: |cb|^2 \leq (|ca|^2 + |ba|^2)$.

Доведено, що $MST(G) \subseteq RNG(G) \subseteq GG(G)$, де $MST(G)$ – остов мінімальної ваги.

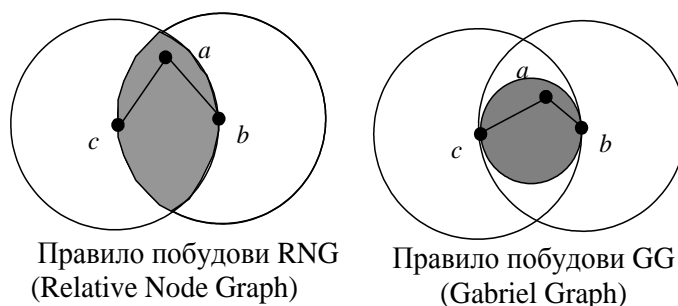


Рисунок 4.6 – Правила побудови RNG, GG графів

Таким чином, процес пошуку нової топології кластера представляє собою послідовне застосування правил отримання RNG та GG графів, а візуально може бути представлено в вигляді дерева пошуку рішень, де вершина дерева – визначена топологія мережі, а ребра – правила отримання нового рішення (корінь дерева – початкова топологія T^0). Для зменшення ширини дерева пошуку реалізується тільки одне правило – включення або виключення одного радіоканалу, який змінює зв'язність кластера. Глибина пошуку обмежена кількістю ретрансляцій в маршрутах передачі від вузла до ГВК.

Дослідження оцінки ефективності алгоритму побудови топології кластера БСМ проводилися для кластерів певної розмірності ($n = 20, 40, 60$) і середнього ступеня зв'язності від $cv = 3 \dots 10$. Для проведення досліджень була здійснена програмна реалізація алгоритму побудови топології кластера БСМ. Результатами роботи програми є (табл. 4.2): виграш (у відсотках) в витратах енергії (в умовних

одиницях) отриманої топології мережі $E(T^*)$ в порівнянні з вихідною топологією $E(T^0)$, де $E(T)$ – сумарні витрати енергії вузлів кластера топології T при наявності маршруту передачі від вузлів до ГВК; відхилення від оптимального рішення, отриманого повним перебором для слабозв'язаних топологій; час пошуку T^k . Результати досліджень ефективності алгоритму побудови топології БСМ показали, що його застосування дозволяє зменшити витрати енергії вузлів (в порівнянні без управління топологією до 15–20 %. Застосування правил дозволяє отримувати рішення в режимі реального часу і відхилення δ від оптимальних рішень не перевищили 7 %.

Таблиця 4.2 – Результати моделювання застосування правил

n	cv	$E(T^0)$	$E(T^*)$	Виграш	δ
20	3	1.041	0.985	5.4	5
20	5	1.212	1.085	10.5	6
20	10	1.434	1.253	12.6	5
40	3	2.511	2.366	5.8	2
40	5	2.875	2.652	7.8	4
40	10	3.023	2.545	15.8	6
60	3	4.134	3.889	5.9	4
60	5	4.367	3.734	14.5	3
60	10	4.867	3.446	18.9	7

Обсяг службового трафіку $V_{\text{стоп}}$ при побудові топології кластера (здійснюється за три ітерації – розповсюдження, збір даних ГВК інформації про стан вузлів за допомогою зондів-запитів та доведення рішення до вузлів кластера за допомогою повідомлень про рішення ГВК):

$$V_{\text{стоп}} = (n_{\text{вузкл}} - 1)(V_{\text{зз}} + V_{\text{зо}} + V_{\text{пр}}).$$

4.5 Побудова та підтримка маршрутів передачі даних в кластері

Завданням методу маршрутизації в кластері є створення і підтримання маршрутів заданої якості між вузлом-відправником і ГВК. На сьогоднішній день запропоновано ряд методів (протоколів) маршрутизації призначених для використання в БСМ (перелік та порівняльна характеристика наведені в [32, 97]). Кожний з методів маршрутизації характеризується своїми перевагами та недоліками. Більшість з них орієнтована збір даних з БСМ без використання ТА і не враховують необхідність врахування декількох цільових функцій управління.

Для реалізації процесу маршрутизації в кластерах БСМ пропонується використовувати зондові методи маршрутизації [32], перевагами яких є: побудова маршруту за необхідністю, незначний службовий трафік для мереж зі стаціонарними вузлами. Основними особливостями запропонованого зондового координатного методу маршрутизації є:

процес побудови маршруту ініціюється відправником при наявності інформації моніторингу та відсутності маршруту передачі або головним вузлом кластера (здійснюється періодично для зменшення обсягу службового трафіка);

побудова маршруту здійснюється шляхом розповсюдження зондів-запитів (в певній обмеженій області з врахуванням координат вузла-адресату) і збору зондів-відповідей, які містять інформацію про можливі маршрути передачі інформації (наприклад, метод зондової координатної маршрутизації типу LAR, Located-Aided Routing [4]);

використанні згортки декількох метрик вибору маршруту, які враховують енергію, яка витрачається вузлами на процес прийомопередачі, та наявну енергію батарей вузлів.

Зазвичай зондова маршрутизація передбачає два основних етапи функціонування: створення маршруту і його підтримка в актуальному стані (приклад на рис. 4.7).

1. Побудова маршруту передачі від вузла до ГВК.

Відправник (вузол 1), якщо він має дані моніторингу для передачі та не має маршруту до головного вузла кластера, широкомовно передає зонд-запит, який містить ідентифікатори відправника і адресата. Вузол, який прийняв зонд-запит, перевіряє наявність активного маршруту до адресата. При його відсутності він додає свій ідентифікатор (метод DSR, Dynamic Source Routing) в поле зонда-запиту і передає його далі своїм сусідам. При наявності маршруту – відправнику надсилається зонд-відповідь з інформацією про маршрут у вигляді послідовності вузлів. Відправник, отримавши зонд-відповідь, записує маршрут в свою маршрутну таблицю. Проміжні вузли, які приймають участь в процесі прийому та обробки зондів, зберігають інформацію про всі отримані маршрути (відбувається процес пасивного формування маршрутних таблиць).

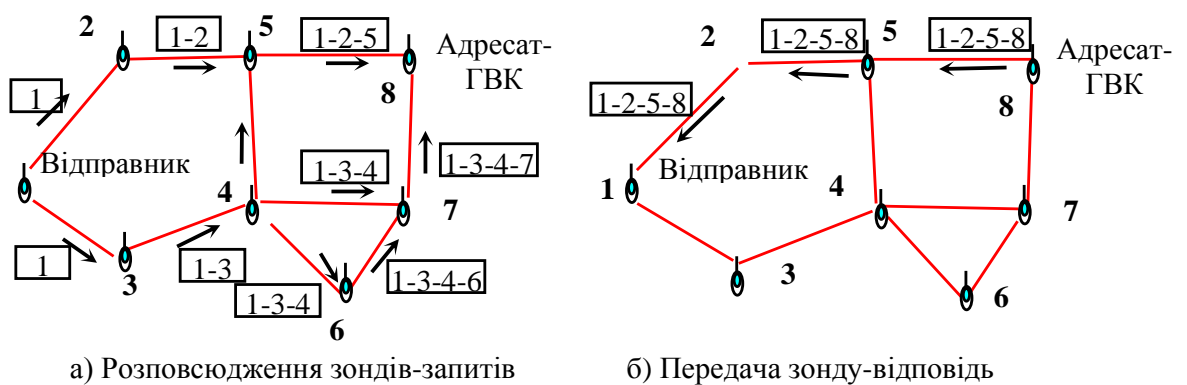


Рисунок 4.7 – Етапи функціонування зондового методу DSR

2. Підтримка існуючого маршруту передачі. Якщо вузол k виявив відмову радіоканалу в маршруті передачі для i -го вузла, то він посилає зонд-відмову вузлу i , який при отриманні зонда-відмови ініціює побудову (за потребою) нового маршруту.

Для зменшення обсягу службового трафіку при побудові (підтримці) маршрутів передачі пропонується періодичне зондування мережі ГВК. Кожен вузол мережі, отримавши вузол-запит, проводить його аналіз, будує свої маршрутні таблиці відповідно до запропонованої метрики, відправляє ГВК узгоджений маршрут обміну. Для вибору маршруту передачі пропонується використовувати множину метрик $\{c_1, c_2, \dots, c_p\}$: енергія, яка витрачається вузлом на прийом-

передачу, наявна енергія батареї вузлів, кількість ретрансляцій, відстань до ГВК тощо. Пріоритет вибору метрики визначає система управління на основі пріоритету цільових функцій управління ($ZF_x \rightarrow c_y$): якщо максимум часу функціонування, то енергозалежні метрики, якщо мінімум часу передачі, тоді пріоритет – кількість ретрансляцій та відстань до ГВК тощо [21].

Для вирівнювання витрат енергії батареї вузлів кластера та зменшення витрат пропонується використовувати згортку двох метрик: енергія, яка необхідна для передачі сусідньому вузлу з певною потужністю передачі, та наявна енергія батареї вузла.

Метрика вартості радіоканалу $i-j$ (c_{ij}^e) – мінімальний рівень витрат енергії (потужності передачі) між сусідніми вузлами i і j , який забезпечує задане значення ймовірності бітової помилки. Залежність рівня витрат енергії (потужності) при передачі від відстані носить нелінійний характер и відповідно в процесі передачі даних по маршруту з декількома переприйманнями малої відстані, витрачає значно меншу енергію, ніж радіоканали значної відстані – $e_{ab} \gg e_{ac} + e_{cd}$ (рис. 4.8).

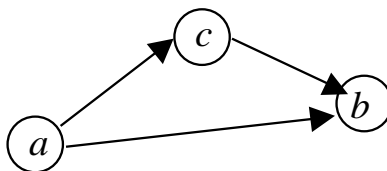


Рисунок 4.8 – Ілюстрація застосування метрики

Крім того метрика повинна враховувати загальні витрати на передачу, прийом, обробку всіх повідомлень V на (в тому числі службових) від сусідів j :

$$c_{ij}^e = e_{\text{пр}ij} V_{\text{пр}ij} + e_{\text{пер}ij} V_{\text{пер}ij}, \quad \forall j \in N_i \quad (4.13)$$

Тоді загальна вартість C_m^e передачі по маршруту m визначається як

$$C_m^e = \sum_{i=1}^{r-1} c_{ij}^e, \quad \forall i, j \in m, j \in N_i,$$

де r – кількість вузлів в маршруті m . Тоді маршрут m_{ab}^* з мінімальною енергією передачі/прийому між відправником a та адресатом b визначається як

$$m_{ab}^* = \arg \min_{m \in M_{ab}} C_m^e,$$

де M_{ab} – множина всіх можливих маршрутів між a і b .

Однак, так як потужність передачі залежить від відстані (d^{α}), то запропонована метрика буде вибирати маршрут з більшою кількістю ретрансляцій в порівнянні з критерієм мінімуму ретрансляцій. Це призведе до збільшення: часу доставки пакету, числа зіткнень (для протоколів випадкового доступу), об'єму службового трафіка та ймовірності нестабільності маршруту (із-за можливості виходу вузлів з ладу). Тобто використання даної метрики доцільне в випадку значної різниці витрат енергії при режимах передача/прийом. Можливим рішенням також є обмеження кількості ретрансляцій граничним значенням r^{\max} , яке може бути визначено на етапі проектування мережі.

Метрика вартості – $c_i^{\delta}(t) = 1/e_i(t) = 0 \dots 100$ – наявна енергія батарей вузлів (менша енергія – більша вартість) в відносних одиницях. Вартість маршруту за енергією батарей C_m^{δ} для маршруту m , який складається з r вузлів, визначається

$$C_m^{\delta} = \sum_{i=1}^{r-1} c_i^{\delta}, \forall i \in m. \quad (4.14)$$

Тоді для знаходження між вузлами a - b маршруту з максимальною енергією батарей m_{ab}^* необхідно розрахувати

$$m_{ab}^* = \arg \min_{m \in M_{ab}} C_m^{\delta},$$

де M_{ab} – множина всіх можливих маршрутів між вузлами a і b .

Отримати згортку метрик (за витратами енергії на прийом-передачу та енергії батарей) через їх різноманітність представляється утрудненим і тому, в залежності від кількості енергії батарей вузлів, вибір маршруту необхідно здійснювати по одній з метрик

$$m_{ab}^* = \begin{cases} \arg \min_{m \in M_{ab}} \sum_{i=1}^{r-1} C_m^e, & \text{якщо } M_{ab}^e \neq 0 \\ \min_{m \in M_{ab}} \max_{m \in M_{ab}} C_m^{\delta}, & \text{інакше} \end{cases} \quad (4.15)$$

де $i, j \in m, i \neq j, j \in N_i$ – сусіди вузла i . При цьому в процесі функціонування мережі значення порогу $c_i^{\delta} = 1 \dots 100$ необхідно поступово зменшуватися для встановлення балансу енергії батарей в вузлах мережі.

На початковому етапі процесу маршрутизації кожен вузол буде використовувати топологію, яка визначена ГВК на етапі побудови топології

кластера. Після обміну службовою інформацією, кожен вузол буде володіти необхідною інформацією для маршрутизації пакетів по запропонованим метрикам.

Підрахуємо зв'язну та часову складність запропонованого методу [4]. Зв'язна складність визначається об'ємом службового трафіка. Кількість службових повідомлень для k -го кластера, які генеруються вузлами на етапі побудови та відмови маршруту:

головний вузол генерує – n_k зондів-запитів в кластері при побудові маршруту, де n_k – кількість вузлів в k -му кластері або $n_{\text{вуззп}}$ зондів-запитів в зоні пошуку адресату в разі відмови вузла при координатній маршрутизації;

звичайний вузол i генерує – $l_{i\text{-ГВК}}$ зондів-відповідей, де $l_{i\text{-ГВК}}$ – довжина маршруту між i -м вузлом и ГВК (в найгіршому випадку $d_{\text{кл}}$ зондів-відповідей, де $d_{\text{кл}}$ – діаметр кластера).

Тоді обсяг службового трафіка $V_{\text{стмар}}$ в кластері при побудові маршруту дорівнює:

$$V_{\text{стмар}i} = n_k V_{\text{зз}} + \sum_{i=1}^{n_k} l_{i\text{-ГВК}} V_{\text{зв}},$$

де $V_{\text{зз}}$, $V_{\text{зв}}$ – обсяги зонду запиту та зонду-відповіді.

Часова складність – $O(2d_{\text{кл}})$ на початковому етапі при зондуванні вузлами та $O(d_{\text{кл}})$ – при зондуванні кластера ГВК.

Тобто показники ефективності запропонованого методу (часова та зв'язна складність) при відмові маршруту мають меншу складність ніж інші класи зондової маршрутизації (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Порівняння характеристика зондових методів маршрутизації

Метод маршрутизації	DSR	Запропонований
Кількість службових повідомлень при ініціалізації маршрута відмова маршруту	$O(2n_k)$ $O(n_k)$	$O(2n_k)$ $O(n_{\text{вуззп}})$
Час побудови при ініціалізації маршрута відмова маршруту	$O(2d_{\text{кл}})$ $O(2d_{\text{кл}})$	$O(2d_{\text{кл}})$ $O(d_{\text{кл}})$
Метрика вибору маршрутів	Кількість ретрансляцій	Множина метрик (енергоефективні)

Отримані значення обсягів службового трафіку враховуються в моделі енерговитрат вузлів в кластері (виразі 4.8 – 4.9 розділу 4.4). Проведені розрахунки вдосконаленого методу маршрутизації зі згорткою метрикам (4.15) дозволили до 17 % знизити енерговитрати вузлів кластера (розділ 5).

4.6. Алгоритми реалізації методу збору даних телекомунікаційними платформами з головних вузлів з кластеризацією мережі

Загальний алгоритм функціонування складається з ієрархічної взаємодії алгоритмів, закладених в центр управління мережею, СУ телекомунікаційними аероплатформами і СУ вузлів мережі.

Узагальнений алгоритм функціонування центра управління мережею.

Основними функціями центру управління мережею є: збір даних про стан мережі, її аналіз, прийняття рішень і реалізація їх виконання. Етапами – планування, розгортання, оперативне управління процесом польоту ТА і процесом збору даних моніторингу. При цьому необхідно вирішувати наступні основні завдання:

1. Розрахунок необхідної кількості ТА і порядку їх використання.

Задано: множина ТА і їх параметри, мережа БСМ і її параметри, директивний час збору даних та ін.

Необхідно: розрахувати кількість ТА, яка необхідна для виконання завдання збору даних при заданих цільових функціях і обмеженнях, сформулювати завдання для кожного ТА. Наприклад, за мінімальний час польоту здійснити обліт і збір даних заданого обсягу від певної кількості вузлів заданою кількістю ТА.

Для цього проводиться розрахунок часу виконання завдання для одного ТА, який не повинен бути не менше часу, необхідного для обльоту маршруту (з заданою кількістю, розташуванням вузлів) і збору даних моніторингу. Якщо один ТА не встигає виконати завдання, проводиться розрахунок для 2-х і так далі. Формуються окремі завдання обльоту та правил збору для кожного члена групи ТА.

Формується план використання групи ТА (запуск, обліт і обслуговування).

2. Визначення оптимальної кількості кластерів (визначається на етапі планування – розділи 2 та 4) і їх параметрів згідно запропонованих моделей та алгоритмів.

При наявності інформації про стан вузлів БСМ рішення по кластеризації приймається центром управління мережею, за її відсутності – здійснюється децентралізованим чином вузлами мережі.

1. Розрахунок точок збору даних (ГВК) і маршруту польоту (розділи 2, 4).

2. Управління польотом ТА процесом збору даних.

Узагальнений алгоритм функціонування системи управління ТА.

1. Збір даних про мережу (кластер) за допомогою обміну даними між ТА і вузлами мережі.

ТА починає політ за заздалегідь визначеним центром управління мережею базовим маршрутом. Під час польоту ТА періодично і широкомовно передає службові повідомлення вузлам мережі з інформацією про свої параметри (адреса, напрямок переміщення, координати, висота, швидкість, стратегії збору і ін.) згідно протоколу обміну (траєкторно-позиційна модель обміну даними – розділ 3).

Кожний головний вузол мережі періодично аналізує наявність передач ТА. При їх наявності вимірює рівень сигналу. ГВК, потрапивши в зону радіозв'язку з ТА, приймає та обробляє його повідомлення, передає ТА інформацію про свої параметри (або параметри кластера: кількість вузлів, координати їх розміщення, зв'язність, рівні енергії батарей, якість каналів, обсяг даних моніторингу та ін.).

2. Після аналізу прийнятої інформації від ГВК (або яка отримана на етапі планування) ТА визначає графік збору даних з ГВК та будує маршрут їх обльоту з урахуванням: пріоритету цільових функцій управління мережею, наявних параметрів ГВК, обсягів даних моніторингу, наявних своїх ресурсів (часу та відстані польоту, вільного об'єму буфера тощо).

Базовий маршрут, побудований системою управління мережею, коригується при обмеженнях на ресурс ТА для виконання всієї задачі збору даних або в залежності від прийнятих стратегій обслуговування:

з гарантованим (ТА облітає всі ГВК доки не будуть зібрані всі дані) або не гарантованим обслуговуванням (ТА збирає максимум можливих даних моніторингу або з максимуму ГВК, але не порушує визначені обмеження);

досягнення певних цільових функцій управління мережею.

3. Обліт визначених вузлів кластера (насамперед ГВК) по скорегованому маршруту, збір інформації від них, зберігання (або для БСМ реального часу передача її на базову станцію мережі загального користування безпосередньо або через повітряну мережу телекомунікаційних аероплатформ).

4. Коригування базового маршруту польоту до наступного кластера з урахуванням пріоритету цільових функцій управління і наявних ресурсів.

5. Прискорене переміщення до наступного кластера.

6. Якщо зібрана інформація з усіх кластерів (заданих вузлів) мережі, то повернутися в кінцеву точку і завершити політ.

Етапи функціонування системи управління вузлом сенсорної мережі.

1. Етап ініціалізації мережі – встановлення радіозв'язності між сусідніми вузлами кластера.

2. Кластеризація мережі (згідно розділів 4.1 – 4.5).

Рішення по кластеризації приймається централізовано (ЦУМ або системою управління ТА) при наявності інформації про стан мережі або її фрагментів. При відсутності в ЦУ мережею інформації про стан БСМ кластеризація здійснюється її вузлами розподіленим чином.

Процес кластеризації включає наступні основні фази: розрахунок кількості кластерів, вибір ГВК, формування кластера, побудова топології та маршрутів кластера, організація процесу передачі даних моніторингу від звичайних вузлів до головного вузла кластера.

ЦУМ на етапі планування визначається оптимальна кількість кластерів згідно запропонованого алгоритму (розділ 4.3). Мінімальна кількість кластерів призводить до зменшення маршруту польоту, але збільшує розмірність кластера і відповідно, обсяг переданих даних між головними вузлами і ТА.

Вибір ГВК здійснюється шляхом обміну службовими повідомленнями між вузлами кластера, узгодження вибору головного вузла на підставі певних метрик (розділ 4.2). У порівнянні з відомими підходами кластеризації пропонується використовувати сукупність метрик. Пріоритет в виборі метрик буде визначатися системою управління вузлів на основі ідентифікації свого стану, стану кластера і пріоритету цільових функцій управління.

3. Побудова топології кластерів відповідно алгоритму (розділ 4.4)
4. Побудова і підтримка в кластерах маршрутів передачі (розділ 4.5).
5. Передача даних моніторингу від вузлів-моніторингу до ГВК.
6. Обробка та зберігання даних моніторингу в головних вузлах кластерів.
7. Очікування головними вузлами мережі сеансу радіозв'язку з ТА.
8. Обмін інформацією між головними вузлами і ТА з заданою якістю.
9. Ротація головних вузлів кластерів після сеансу обміну з ТА (визначається та ініціюється самим вузлом або ТА).

Висновки до розділу 4

1. Вдосконалено метод збору даних моніторингу ТА з головних вузлів кластеризованої БСМ. Відмінність розробленого методу від відомих, що визначає його новизну, полягає в тому, що вперше запропоновано нові підходи до кластеризації мережі:

нова множина метрик вибору головних вузлів, орієнтованих для досягнення певних цільових функцій управління збором даних моніторингу;

використання нових правил знаходження енергоефективних топологій кластерів методом спрямованого перебору варіантів топологій;

застосування нових метрик вибору маршрутів при застосуванні зондового координатного методу маршрутизації в кластері, що дозволяє скоротити час збору даних моніторингу, збільшити час функціонування мережі.

2. Розглянуто основні завдання управління БСМ з кластеризацією: знаходження кількості та розмірності кластерів, вибір головних вузлів кластерів, побудова топології кластера та організація процесу маршрутизації в кластері.

Вузли кожного кластера будують та підтримують топологію кластера та маршрути передачі даних від вузлів-моніторингу до головних вузлів, які збирають і зберігають дані моніторингу свого кластера мережі до підльоту ТА. ТА облітає головні вузли, які при встановленні з ним радіозв'язності передають дані моніторингу вузлів кластера до ТА.

Перевагами методу збору даних з головних вузлів в порівнянні з безпосереднім збором даних є: значне скорочення часу збору інформації моніторингу та менша кількість ТА, яка необхідна для збору даних. Однак цей метод потребує розробки та реалізації додаткових алгоритмів управління мережею, що підвищують вимоги до апаратно-програмного забезпечення вузлів БСМ та додають додатковий службовий трафік: на побудову кластерів, на вибір головних вузлів кластерів, побудову топології та маршрутів передачі даних в кластері.

3. Запропонована аналітична модель оцінки часу функціонування мережі, яка враховує втрати енергії вузлів в певних режимах роботи (передача, прийом, моніторинг, сон), їх взаємне розташування, обсяг даних моніторингу, кількість та розміри кластерів, кількість раундів обльоту, що дозволяє розрахувати необхідну кількість кластерів в мережі та їх розмірність.

4. Показано, що скорочення часу збору даних за допомогою ТА, збільшення часу функціонування мережі може бути досягнуто за рахунок оптимізації: кількості і параметрів кластерів обміну, метрик вибору головних вузлів кластерів, правил побудови топології кластерів, метрик вибору маршрутів в кластерах..

5. Запропоновано вдосконалений алгоритм управління топологією кластерів БСМ. Запропоновані енергоефективні продукційні правила побудови топології, які дозволяють в режимі реального часу будувати топологію кластерів, яка дозволяє отримувати потенційні маршрути передачі даних між вузлами моніторингу та головними вузлами. Застосування запропонованого алгоритму дає можливість економити до 20 відсотків енергії вузлів кластерів.

6. Запропоновано вдосконалений алгоритм зондової координатної маршрутизації, який будує та підтримує маршрути передачі в залежності від цільових функцій управління. Запропоновано використовувати згортку метрик (енергія прийомопередачі, енергія батареї вузла, кількість ретрансляцій, відстань до ГВК та їх згортка) вибору маршрутів передачі даних між вузлами-моніторингу до головних вузлів. В залежності від цільових функцій управління мережею використовується певна множина метрик.

В порівнянні з існуючими зондовими методами запропонований метод потребує менше службового трафіку за рахунок зондування кластера тільки головним вузлом.

7. Розроблено узагальнений алгоритм реалізації методу збору даних моніторингу з головних вузлів ТА, який реалізує сукупність алгоритмів управління: центру управління мережею, ТА, головних вузлів, вузлів-маршрутизаторів, вузлів моніторингу. Проведена оптимізація режимів роботи мережі в залежності від цільових функцій управління.

8. Проведено експерименти і отримані залежності (розділ 5): часу збору даних, часу стабільного функціонування мережі від розмірності мережі; середньої витрати енергії вузлів при різній кількості об'єктів при застосуванні різних методів збору даних. Показано, що запропонований алгоритм дозволяє підвищити ефективність процесу збору даних з головних вузлів використанням ТА.

Застосування методу дозволяє отримати вигоду за цими показниками мережі на 10 – 15 % у порівнянні з існуючими відповідними методами збору даних.

В порівнянні з методом безпосереднього збору метод збору даних з головних вузлів він дозволяє скоротити час збору даних до 30 %, забезпечити гарантоване обслуговування вузлів, однак цей метод вимагає обов'язкової наявності зв'язності між вузлами кластерів.

Основні результати розділу опубліковано автором у наукових працях: [32, 52, 53, 55].

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗБОРУ ДАНИХ З БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

В процесі побудови математичних моделей функціонування БСМ доводиться вирішувати компроміс між повнотою опису мережі і складністю адекватних її моделей. В попередніх розділах дисертації було вдосконалено два методи збору даних ТА з вузлів БСМ. Для оцінки ефективності запропонованих методів необхідно розробити методику порівняння синтезованих методів з існуючими.

5.1 Показники оцінки ефективності функціонування БСМ

Оцінка ефективності функціонування БСМ може здійснюватися на різних етапах її функціонування: планування, розгортання, відновлення, нарощування, оперативного управління (рис. 5.1) [23].

Часові інтервали на реалізацію даних етапів повинні бути не більше заданих, тобто час планування $t_{пл} \leq t_{плзад}$, час розгортання $t_{роз} \leq t_{роззад}$, час відновлення (нарощування) $t_{від} \leq t_{відзад}$ мережі повинні бути не більше заданих (директивних).

Ефективність оперативного управління може визначатися величиною циклу управління $T_{ц} \rightarrow \min$, якістю прийнятих рішень центром управління мережею (в цілому оцінюється ступенем досягнення мети управління на множині показників функціонування мережі), витраченими ресурсами, обсягом службової інформації $V_{ст}$, що витрачається на її реалізацію.

Процес функціонування системи управління БСМ на відміну від традиційних мереж включає в себе функціонування наступних основних підсистем покриття та моніторингу, телекомунікацій, енергозбереження та збору даних. Розглянемо показники оцінки ефективності кожної з них (рис. 5.1).

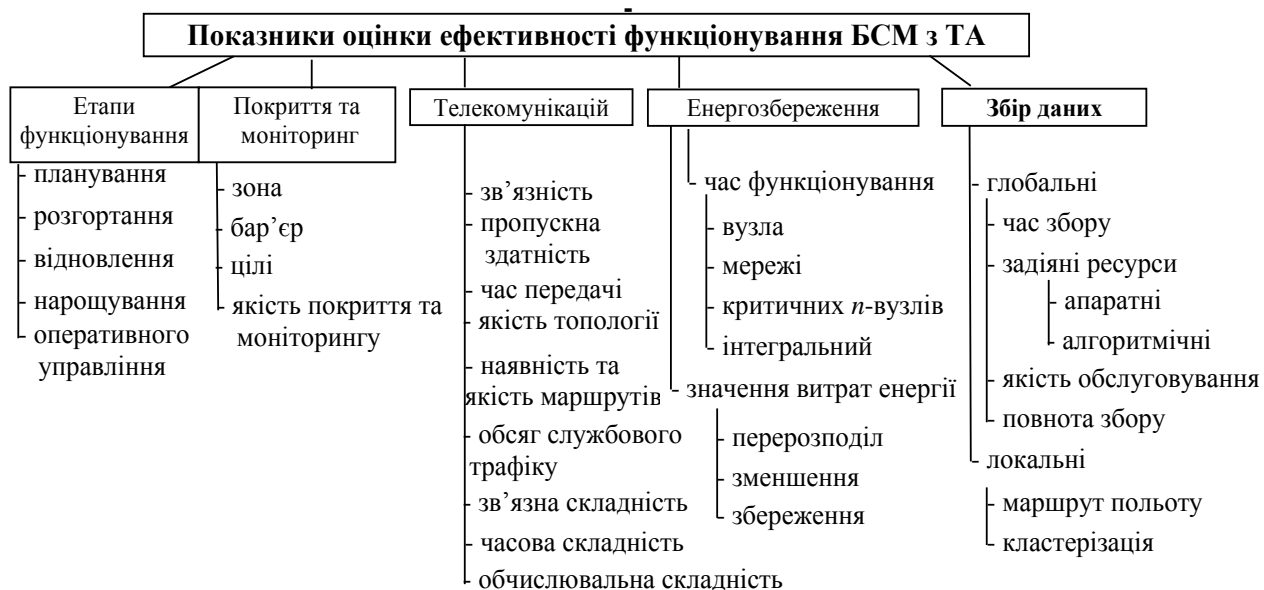


Рисунок 5.1 – Показники оцінки ефективності функціонування БСМ з ТА

1. Підсистема покриття та моніторингу. Її завдання забезпечити покриття зони (площі, об'єктів, цілей, бар'єру тощо) та моніторинг заданої множини параметрів (температура, вологість, тиск, звук, вібрація, зараженість, рух об'єктів тощо).

Показниками якості функціонування підсистеми покриття та моніторингу можуть бути: час розгортання, ступінь покриття заданої зони (цілі, бар'єру), час її моніторингу $t_{\text{монмін}} < t_{\text{мон}} < t_{\text{монмах}}$, ймовірність виявлення подій ($p_{\text{вп}}$), точність спостереження (помилки виміру), необхідна кількість вузлів (параметрів моніторингу) для конкретних об'єктів моніторингу ($n_{\text{обмон}}$), інтенсивність ($\lambda_{\text{мон}}$) і тип трафіку моніторингу $\eta_{\text{мон}}$ тощо. Від ступеня досягнення даних показників вимогам буде визначатися якість покриття та моніторингу.

2. Підсистема телекомунікацій. Ця підсистема повинна забезпечити передачу даних від вузлів, які здійснюють моніторинг, до ТА і далі до базової станції (центру збору даних) з заданою якістю. Процесу передачі передують етапи побудови та підтримки системою управління БСМ кластерів мережі, точок збору даних ТА, маршруту обльоту. Для підсистеми телекомунікацій основними показниками оцінки ефективності є: наявність зв'язності між вузлами, пропускна здатність, затримка передачі, обсяг службового трафіку, витрати ресурсів тощо.

3. Підсистема енергозбереження. Так як вузли БСМ мають автономні джерела живлення, то однією з основних цілей управління мережею при забезпеченні заданої якості процесів покриття, моніторингу та передачі даних є збільшення тривалості функціонування мережі на основі реалізації різних методів управління, націлених на зменшення витрат та збереження енергоресурсу кожного вузла, перерозподіл витрат енергії між вузлами БСМ а також між вузлами і ТА.

4. Підсистема збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами. Збір даних моніторингу виступає в ролі підсистеми системи управління БСМ і тому його оцінка з позицій системного підходу повинна здійснюватися як за показниками функціонування самої мережі:

час збору даних – $T_{зб}$;

час функціонування БСМ – $T_{ф}$;

кількість ресурсів (ТА, енергії вузлів, час тощо), витрачених на їх реалізацію;

повнота та своєчасність збору даних моніторингу, їх об'єм;

так і за показниками, які характеризують складові процесу збору даних:

показники маршруту польоту ТА (довжина маршруту польоту ТА, кількість точок обльоту, витрати ресурсів ТА на політ, обчислювальна складність розрахунку маршруту тощо);

ресурси, які витрачаються на побудову та функціонування кластерів: формування кластера, його топології та маршрутів передачі тощо.

5.2 Методика оцінки ефективності методів збору даних ТА з БСМ

Одним з основних завдань при системному проектуванні БСМ з ТА є обґрунтований вибір (чи синтез) методу збору даних моніторингу, який припускає наявність методики оцінки його ефективності.

Постановка задачі. Задані: характеристики БСМ, вузлів, ТА; множина методів збору даних (МЗД), які пропонуються для реалізації в даній БСМ; вимоги до методів збору даних з БСМ ТА.

Необхідно: оцінити ефективність запропонованих методів збору даних і дати рекомендації щодо їх застосування в БСМ.

Методика оцінки ефективності методів збору даних в БСМ з ТА включає наступні етапи.

1. Аналіз умов застосування та функціонування мережі, визначення вихідних даних у вигляді: характеристик вузлів БСМ; характеристик ТА; характеристик МЗД, що досліджуються та вимог до них.

2. Вибір показників ефективності функціонування МЗД.

3. Побудова моделі функціонування БСМ з ТА, моделей функціонування методів збору даних моніторингу та проведення експериментів.

4. Одержання залежностей глобальних (час збору, час функціонування БСМ, кількість задіяних ТА тощо) та локальних показників ефективності МЗД від різних умов функціонування БСМ.

5. Оцінка ефективності МЗД за визначеними показниками.

В результаті аналізу застосування БСМ з ТА і характеристик її елементів повинні бути отримані наступні вихідні дані.

1. Характеристики наземно-повітряної мережі:

розмірність та фізичний розмір мережі: N – кількість сенсорних вузлів мережі, d – її діаметр і площа розміщення; $N_{ТА}$ – кількість ТА;

характеристики наземних та повітряних вузлів мережі, які описані на різних рівнях OSI: фізичному, каналному; мережевому, транспортному; прикладному (досліджувані методи збору даних), апаратурному (обсяг буферів, характеристики процесора, витрати енергії на передачу, прийом, моніторинг даних) тощо;

технічні характеристики наземних вузлів і ТА;

характеристики радіоканалів (протокол, швидкість передачі в каналі; пропускна здатність каналу тощо);

вихідні варіанти топології БСМ (вихідні координати розміщення на місцевості – x_i , y_i , середній ступінь зв'язності мережі тощо).

2. Параметри інформаційного обміну та збору даних в мережі:

вимоги до якості інформаційного обміну: граничне значення часу передачі даних моніторингу;

обсяг даних моніторингу i -го вузла – $V_{\text{дм } i}$;

вимоги до параметрів якості збору даних моніторингу: забезпечення гарантії збору всіх даних зі всіх вузлів, допустимий час збору даних.

3. Характеристики МЗД, що досліджуються: $\{\text{МЗД}\} = \{\text{МЗД}_1, \dots, \text{МЗД}_m\}$:

тип методу збору даних: безпосереднього збору з вузлів, з головних вузлів;

тип кластерів: віртуальний (організовує ТА) або реальний;

процедура побудови кластерів: метрики та алгоритм вибору головного вузла, алгоритми побудови та підтримки топології і маршрутизації;

алгоритм побудови маршруту обльоту: глобальний (базовий) та локальний (в кластерах);

вид обслуговування: з гарантією, без гарантії;

тип управління: централізований, децентралізований, кооперований;

стратегії (правила) обльоту в кластерах, які визначаються цільовими функціями управління.

Показники ефективності методів збору даних доцільно розбити на три групи: глобальні, локальні та експлуатаційно-фінансові.

Глобальні (мережеві) показники:

час збору даних $T_{\text{зб}}$;

час функціонування БСМ $(T_{\text{ф}}(N) = \max_{i \in N} t_{\text{ф}i}$ – час стабільної роботи до виходу першого i з ладу або співвідношення працездатних вузлів до загальної кількості в певний момент часу) [23];

кількість ресурсів (ТА, енергії вузлів, час), витрачених на їх реалізацію;

повнота та своєчасність збору даних-моніторингу, їх об'єм (частка обслуговуваних вузлів за раунд обльоту; частка обсягу даних, зібраних за раунд обльоту).

Локальні, які визначають складові процесу збору даних ТА:

маршрут польоту (довжина маршруту польоту ТА, кількість точок обльоту, витрати ресурсів ТА на політ, обчислювальна складність розрахунку маршруту тощо);

процес побудови та функціонування кластерів: час формування кластера, кількість службових повідомлень, обчислювальна складність;

процес побудови топології в мережі (підмережі, кластері) – час побудови, кількість та об'єм службових повідомлень, обчислювальна складність;

процес побудови та підтримки маршрутів передачі (в мережі, підмережі, кластері) – час побудови, кількість та об'єм службових повідомлень, обчислювальна складність.

До третьої групи варто віднести економічні та експлуатаційні показники. Вони характеризують фінансові витрати на розробку спеціального програмного забезпечення систем управління мережею, їх розгортання та експлуатацію.

Для оцінки ефективності МЗД за глобальними показниками необхідно одержати значення $T_{зб}$, $T_{ф}$ та інших при різних умовах функціонування мережі: кількість наземних вузлів – N , кількість ТА – $N_{ТА}$, кількість кластерів, кількість вузлів в кластері, стратегії обльоту ТА тощо.

Для оцінки ефективності методів збору даних між собою за локальними показниками необхідно провести оцінку кожного з них за витратами певного ресурсі мережі.

5.3 Результати моделювання

Розглянемо результати моделювання для наступних основних вихідних даних. Однорідні вузли БСМ розташовані випадковим чином на певній площині. Кількість сенсорних вузлів – $N = 400$. Кількість вузлів в кластері – $n_k = 10, 20, 50$. Початкова енергія вузлів – $e_0 = 0.1$ Дж. Дальність радіозв'язку – $d_{\max} = 250$ м, максимальна висота польоту ТА – $h_{\max} = 250$ м, максимальна швидкість польоту – $v_{\max} = 10$ м/с, кількість раундів обльоту – $NR_{\text{зад}} = 700$. Протокол доступу до каналу IEEE 802.11g, розмір даних моніторингу вузла – 100 Кб.

Будем розглядати та порівнювати наступні методи збору даних за відповідними класами:

1. Відомий метод безпосереднього збору при центроїдній кластеризації ТА.
2. Вдосконалений метод безпосереднього збору даних з вузлів при кластеризації ТА при реалізації різних стратегій (правил обльоту та обміну даними в кластерах, які визначені в розділі 2):
 - а) стратегія № 1 – точка збору даних ТА тільки в центрі кластера;
 - б) стратегія № 2 – збір інформації ТА з врахуванням правил обльоту „критичних” вузлів;
 - в) стратегія № 3 – збір інформації ТА з врахуванням правил обміну з вузлами, ближчими до траєкторії обльоту кластера;
 - г) стратегія № 4 – збір інформації ТА з вузлів при кооперативній роботі по створенню мінікластерів та побудови енергоефективних маршрутів до вузлів, які знаходяться ближче до маршруту обльоту кластера;

3. Вдосконалений метод збору даних моніторингу з головних вузлів в кластеризованій мережі (розділ 4) будемо порівнювати з методом, який використовує алгоритм кластеризації вузлів HEED (розділ 4.2.1).

Ефективність функціонування методів будемо оцінювати за ступенем досягнення цільових функцій управління: час збору даних моніторингу $T_{зб}$, час функціонування БСМ – $T_{ф}$, який будемо оцінювати значеннями відмов вузлів в відсотках через розряд їх батарей. Чим вище значення $T_{ф}$, тим менша кількість працездатних вузлів залишається в мережі (якщо $T_{ф} = 100\%$ – це означає що немає працездатних вузлів для передачі даних і, отже, в ньому енергія споживання $e_{сп}$ стає нулем). Для підрахунку цих показників будемо використовувати аналітичні моделі, які запропоновані в розділах 2 та 4. Моделювання та розрахунки здійснено в середовищі MATLAB.

На рис. 5.2 наведені залежності часу збору даних від методу збору (центроїдний та вдосконалений методи збору даних) при різній кількості вузлів в віртуальному кластері $n_k = 10, 20, 50$. Можемо спостерігати переваги вдосконаленого методу безпосереднього збору даних. Час збору даних з вузлів ТА при цьому методі

зменшується на 10 – 15% за рахунок зменшення точок обльоту (застосування алгоритму кластерного аналізу FOREL).

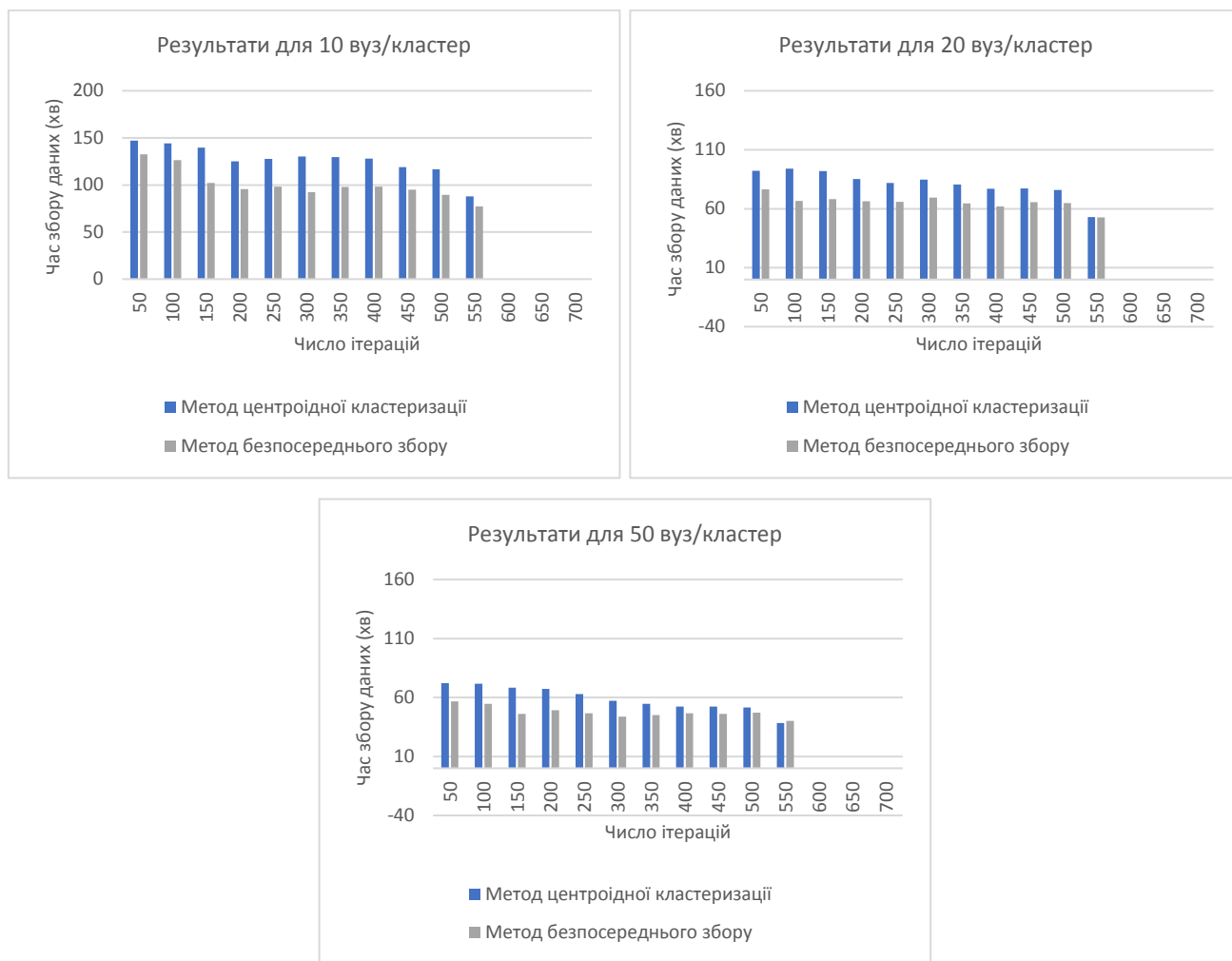


Рисунок 5.2 – Залежність часу збору даних від методу збору при різній кількості вузлів в кластері $n_k=10, 20, 50$

На рис. 5.3 наведені залежності часу функціонування БСМ від методу збору (центроїдний та безпосереднього збору даних) при різній кількості вузлів в віртуальному кластері $n_k=10, 20, 50$. Вдосконалений метод безпосереднього збору даних дозволяє збільшити час функціонування мережі на 12 – 17 % за рахунок застосування правил зменшення витрат енергії вузлами при обміні з ТА, які розглянуті в розділі 2.6).

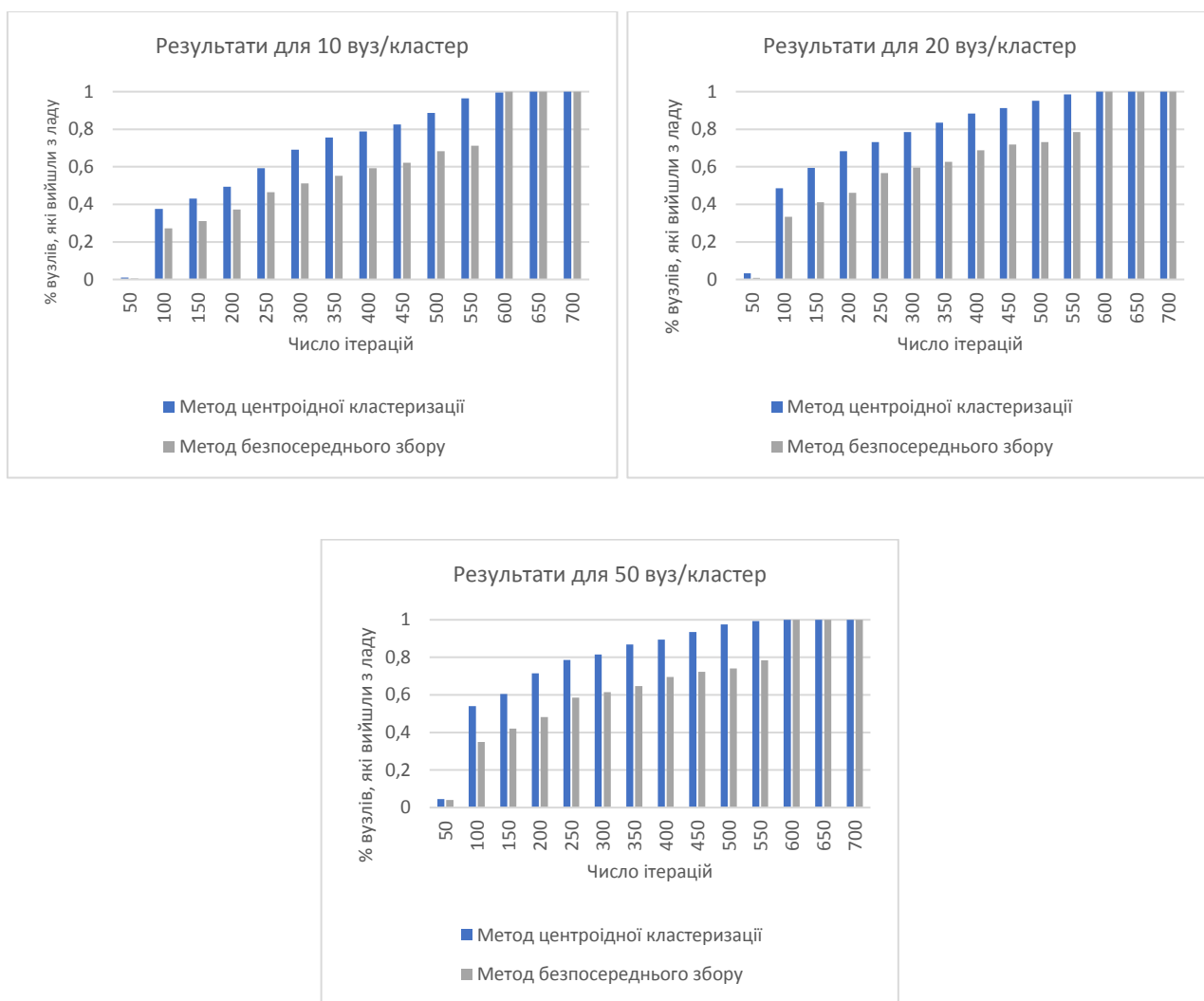


Рисунок 5.3 – Залежність часу функціонування БСМ від методу збору при різних кількості вузлів в кластері $n_k=10, 20, 50$

На рис. 5.4 – 5.7 наведені результати моделювання застосування запропонованих правил зменшення витрат вузлів при реалізації вдосконаленого методу безпосереднього збору даних ТА. На цих рисунках горизонтальна вісь являє собою кількість ітерацій, що означає кількість раундів об'їзду ТА.

Зменшення середньої енергії споживання вузлом $e_{сп}$ зі збільшенням раундів об'їзду обумовлюється тим, що залишається менша кількість працездатних вузлів. Це пояснюється тим, чим менша кількість вузлів, тим менше можливостей витратити багато енергії завдяки відокремленим вузлам. Отже, значення середньої енергії, яка споживається всіма вузлами в кластері незначне.

На рис. 5.4 показані значення $e_{\text{сп}}$ і $T_{\text{ф}}$ для стратегії № 1 (ТА летить над центром кластера), на рис. 5.5 – для стратегії № 2 (ТА летить над вузлом, який має найменший рівень енергії та потім через центр кластера).

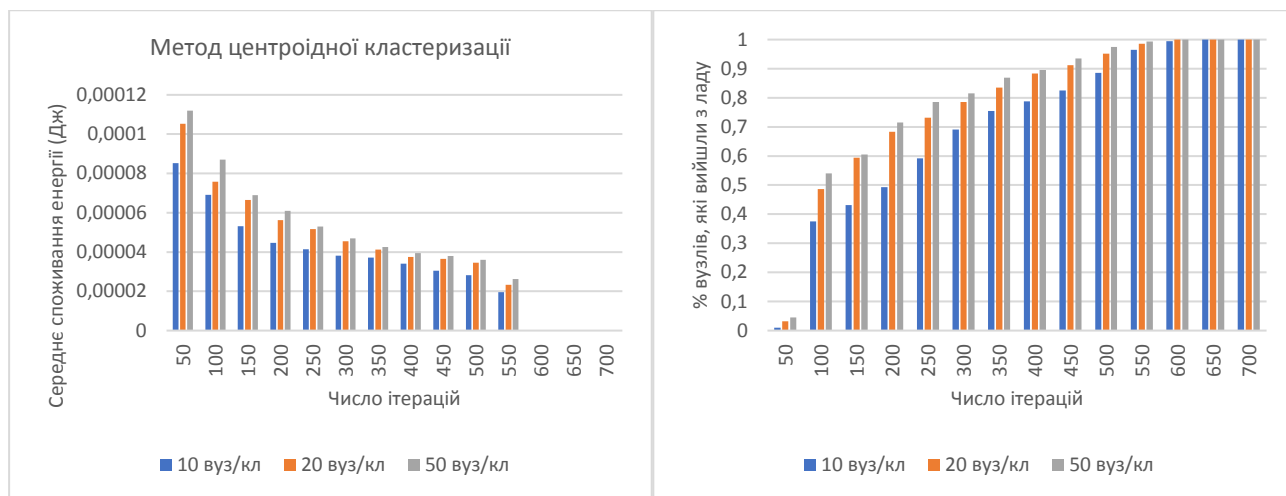


Рисунок 5.4 – Середнє споживання енергії вузла і відсоток виходу з ладу вузлів при обльоті ТА тільки центрів кластерів (стратегія № 1)

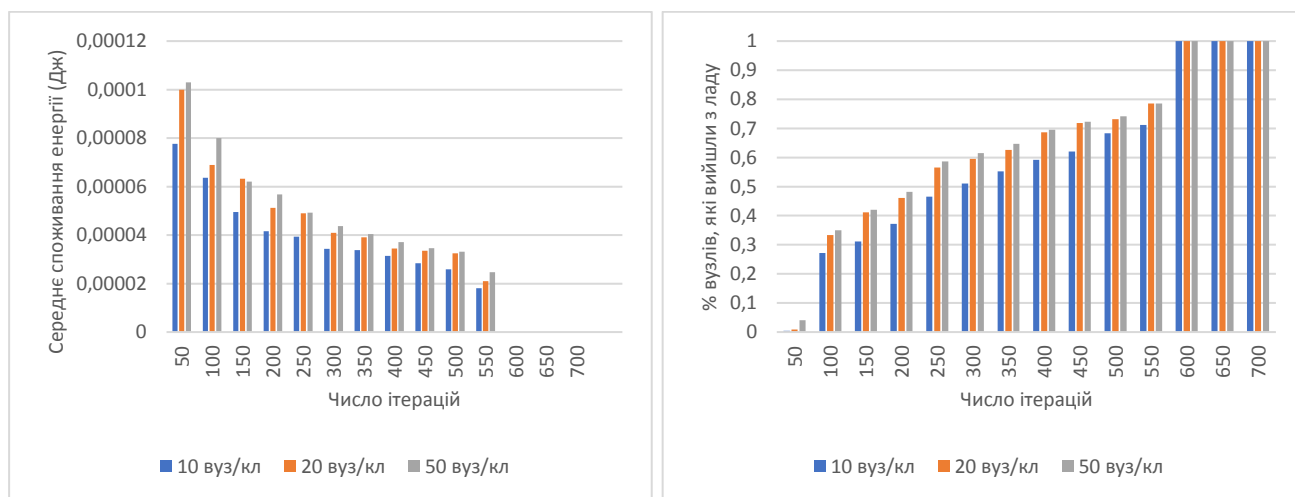


Рисунок 5.5 – Середнє споживання енергії вузла і відсоток виходу з ладу вузлів при обльоті критичних вузлів (стратегія № 2)

На рис. 5.6 наведені результати моделювання стратегії № 3 (вузли, які ближчі до маршруту обльоту кластера, передають дані).

З результатів моделювання, які наведені на рис. 5.4 – 5.6, спостерігається загальна тенденція – зі збільшенням раундів збору даних ТА зменшується середня енергія споживання та збільшується кількість непрацездатних вузлів в мережі. Це пояснюється наступним: на початкових раундах обльоту кожний кластер містить

багато працездатних вузлів, але ця кількість зменшується зі зростанням кількості раундів обльоту.

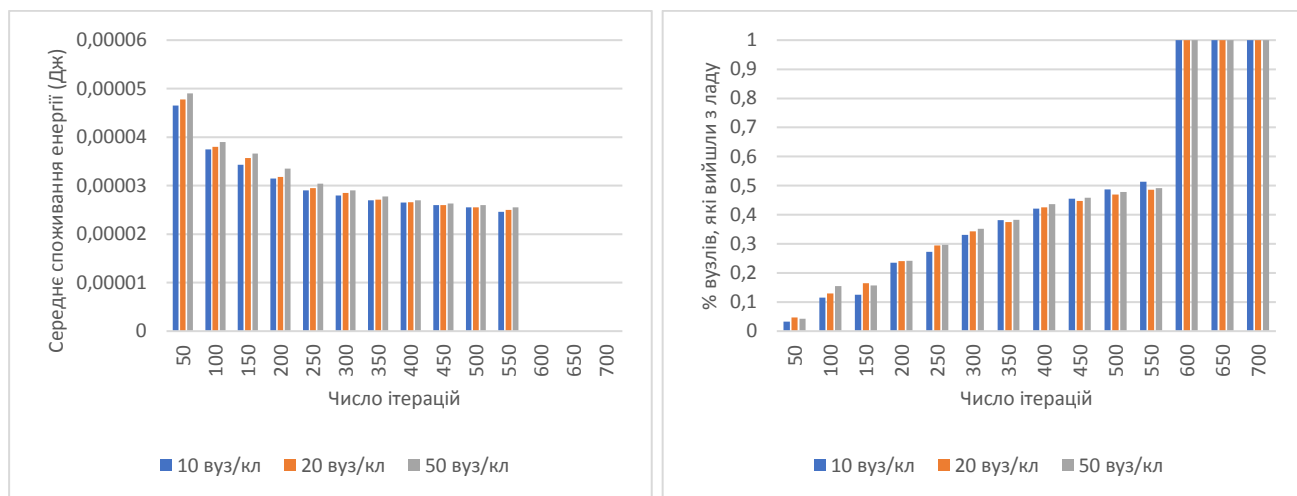


Рисунок 5.6 – Середня витрата енергії на вузол та відсоток виходу з ладу вузлів при кооперованій стратегії обльоту (стратегія №3)

Кращі результати серед трьох стратегій продемонструвала стратегія № 3 (рис 5.4) (найменше споживання енергії і найменший відсоток непрацездатних вузлів) у порівнянні з результатами у попередніх двох стратегій.

Застосування кооперативної стратегії № 4 (маршрутизація даних з вузлів кластера до вузла, який знаходиться ближче до траєкторії польоту ТА з використанням енергоефективних метрик пошуку маршруту) показало помітну перевагу в низькому споживанні енергії та часі функціонування мережі (рис. 5.7).

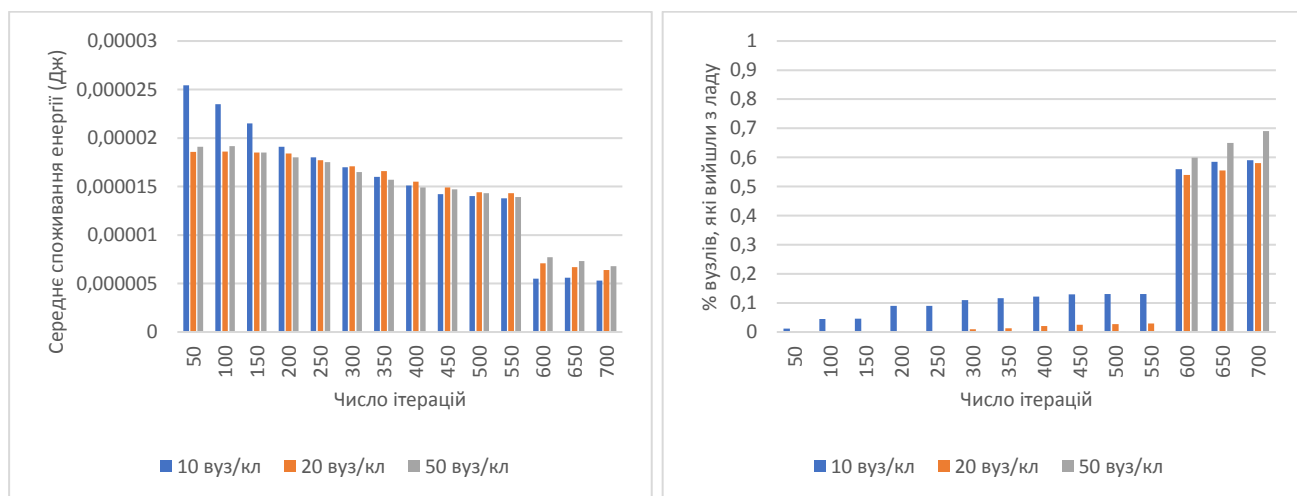


Рисунок 5.7 – Середнє споживання енергії та відсоток непрацездатних вузлів при використанні енергоефективних метрик вибору маршруту (стратегія № 4)

Так після 600 раундів, в усіх трьох стратегіях різко знижується кількість працездатних вузлів (стратегії № 1 – 3), але 40% працездатних вузлів залишається при використанні стратегії № 4. Показано, що щільніше розташування вузлів призведе до меншого енергоспоживання і більшої тривалості часу функціонування. Це є результатом використання енергоефективної метрики побудови маршруту для пошуку маршрутизатора з більшою енергією батареї.

На рис. 5.8 та 5.9 наведені результати моделювання вдосконаленого методу збору даних ТА з головних вузлів кластера в порівнянні з методом свого класу (NEED) за показниками час збору даних та час функціонування мережі.

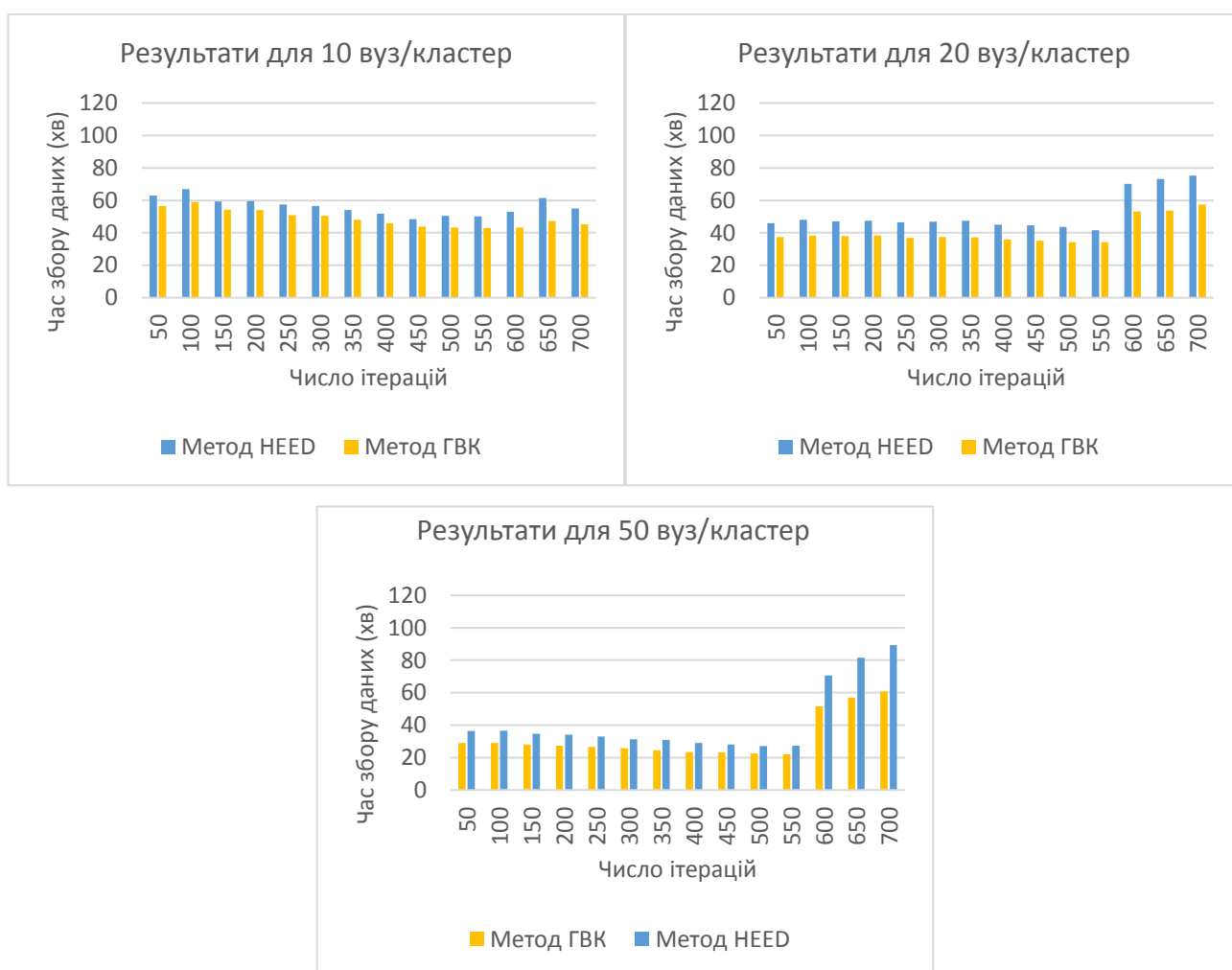


Рисунок 5.8 – Залежності часу збору даних з БСМ ТА для методу HEED та запропонованого вдосконаленого методу збору з головних вузлів

У запропонованого методу в порівнянні з методом HEED час збору даних менший в середньому на 14% за рахунок використання та пріоритету метрики

вибору головного вузла кластера – коротша відстань до траєкторії польоту ТА. Виграш збільшується з зростанням частки вузлів, які відмовили. Витрати енергії вузлів при реальній кластеризації в запропонованому методі зменшуються на 10 – 15% внаслідок застосування енергозберігаючих правил побудови топології кластерів, вирівнювання витрат енергії вузлів при побудові маршрутів передачі в кластері (вибираються з множини можливих маршрутів передачі між вузлом та ГВК маршрути, які мають мінімум витрат енергії на передачу та вузли, рівень батарей яких не перевищують граничний рівень).

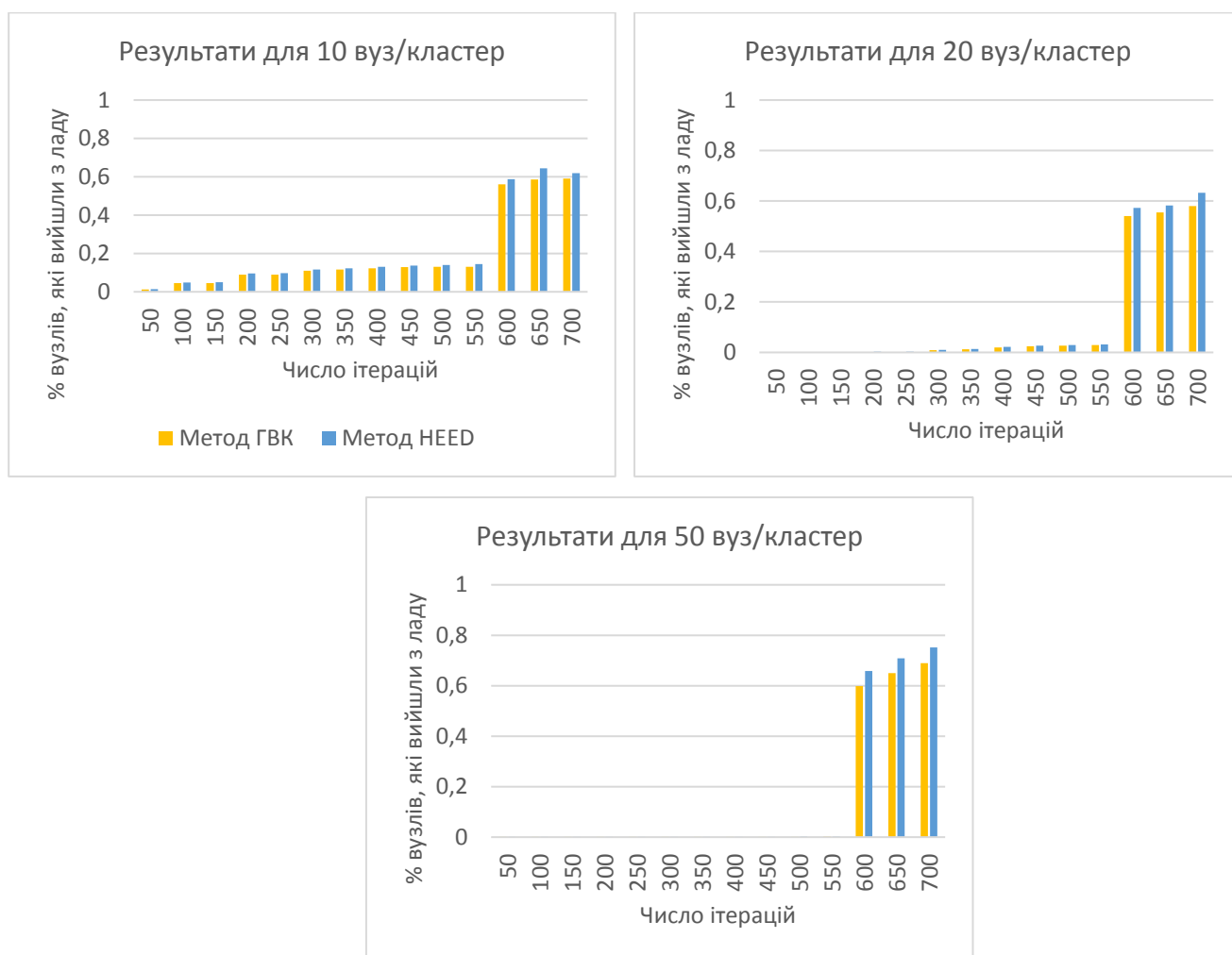


Рисунок 5.9 – Залежності часу функціонування БСМ для методу HEED та запропонованого методу збору з головних вузлів ТА

Оцінка витрат ресурсів (кількість службових повідомлень, час побудови) на кластеризацію, побудову топології кластерів, побудову та підтримку маршрутів передачі в кластерах проводилась під час розгляду їх алгоритмів в розділі 4.

Висновки до розділу 5

1. Визначена множина показників ефективності функціонування БСМ для різних етапів функціонування, кожної з функціональних підсистем системи управління БСМ: покриття та моніторингу, телекомунікаційної, енергозберігаючої та збору даних.

Для оцінки методів збору даних запропоновано три групи показників ефективності: глобальні, локальні та експлуатаційно-фінансові.

Глобальні (мережеві) показники: час збору даних; час функціонування БСМ; кількість ресурсів (ТА, енергії вузлів, час), витрачених на їх реалізацію; повнота та своєчасність збору даних моніторингу, їх об'єм.

Локальні, які визначають складові процесу збору даних:

параметри маршруту польоту (довжина маршруту польоту ТА, кількість точок обльоту, витрати ресурсів ТА на політ, обчислювальна складність розрахунку маршруту тощо);

параметри процесу побудови та функціонування кластерів: ступінь досягнення цільової функції управління, час формування, кількість службових повідомлень, обчислювальна складність;

параметри процесу побудови топології – ступінь досягнення цільової функції управління, час побудови, кількість та об'єм службових повідомлень, обчислювана складність;

параметри процесу побудови та підтримки маршрутів передачі (в мережі, підмережі, кластері) – ступінь досягнення цільової функції управління, час побудови, кількість та об'єм службових повідомлень, обчислювана складність.

Третя група показників – економічні та експлуатаційні показники. Вони характеризують фінансові витрати на розробку спеціального програмного забезпечення системи управління мережею, її розгортання та експлуатацію.

3. Проведені дослідження ефективності вдосконалених методів збору даних моніторингу при різних вихідних даних: розмірність мережі, кількість кластерів,

кількості вузлів в кластері, варіантах побудови методів збору даних, стратегії обльоту вузлів в кластері.

4. Результати моделювання вдосконаленого безпосереднього методу збору даних ТА з існуючим центроїдним методом збору даних моніторингу продемонстрували, що час збору даних з вузлів ТА при цьому методі зменшується на 10 – 15% за рахунок зменшення точок обльоту (застосування алгоритму кластерного аналізу FOREL). Вдосконалений метод дозволяє збільшити час функціонування мережі на 12 – 17 % за рахунок застосування правил зменшення витрат енергії вузлами при обміні з ТА.

Проведений аналіз чотирьох стратегій обльоту кластера (тільки між центрами точок збору; обліт критичних вузлів; передача в точках, ближчих до маршруту обльоту; кооперативна) показав переваги кооперованої стратегії, яка дозволяє в порівнянні з іншими до 15 % зменшити витрати енергії вузлів в кластерах.

5. Проведена оцінка ефективності вдосконаленого методу збору даних з головних вузлів кластеризованої мережі показала його переваги відносно існуючих методів даного класу. В порівнянні з методом кластеризації HEED вдосконалений метод дозволяє скоротити час збору даних моніторингу в середньому на 14 %, збільшити час функціонування мережі на 10 – 15 %.

Основні результати розділу опубліковано автором у наукових працях: [18, 20, 22, 23, 29, 32, 44, 56, 57].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача підвищення ефективності збору даних моніторингу з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами.

Основні наукові висновки і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. В останні роки в усьому світі все більше застосування знаходять безпроводові сенсорні мережі – розподілені, самоорганізуючі мережі, що складаються з множини вузлів (датчиків, сенсорів), об'єднаних між собою радіоканалами, та здійснюють моніторинг параметрів зовнішнього середовища або об'єктів спостереження. Перевагами даного класу мереж є: можливість розташування в важкодоступних місцях (де складно, дорого або неможливо реалізувати телекомунікаційну інфраструктуру); оперативність, зручність розгортання та обслуговування системи; надійність мережі в цілому; легкість масштабування; тривалий час роботи без втручання людини і ін.

2. Для реалізації ефективного процесу збору даних моніторингу з БСМ телекомунікаційними аероплатформами в системі управління безпроводовою сенсорною мережею необхідно створити відповідну підсистему, яка буде реалізувати відповідні методи і алгоритми управління.

Запропоновані на сьогодні методи і алгоритми збору даних з БСМ телекомунікаційними аероплатформами вирішують лише часткові завдання збору даних, не враховують особливості функціонування конкретних мереж, багатокритеріальний характер цільових функцій управління мережею та потребують вдосконалення.

3. Вдосконалено метод безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів БСМ з їх кластеризацією телекомунікаційними аероплатформами.

Відмінність розробленого методу від відомих, що визначає його новизну, полягає в наступному:

на етапі кластеризації мережі – застосування двох алгоритмів кластерного аналізу FOREL та k -середніх для здійснення віртуальної кластеризації мережі, які, на відміну від відомих, адаптують розмір зони обслуговування телекомунікаційної аероплатформи для забезпечення цільових функцій управління мережею та характеризуються незначною обчислювальною складністю;

на етапі обльоту кластера мережі телекомунікаційною аероплатформою запропоновані правила вибору точок обміну в кластері для зменшення витрат енергії вузлів (відповідно збільшення часу функціонування мережі).

Це дозволяє отримати в режимі реального часу близькі до оптимальних рішення і використовувати алгоритм для оперативного управління переміщенням (знаходження положення) телекомунікаційних аероплатформ.

Застосування методу дозволяє отримати вигоду у часі збору даних моніторингу мережі на 10 – 15 % (за рахунок зменшення точок збору даних), та збільшити час функціонування мережі на 12 – 17 % (за рахунок нових правил обміну та обльоту вузлів в кластерах) у порівнянні з існуючими центроїдними методами безпосереднього збору даних.

Проведений аналіз чотирьох стратегій обльоту кластера ТА і обміну даними (тільки центри кластерів; обліт критичних вузлів; передача в точках, ближчих до маршруту обльоту; кооперативна) показав переваги кооперованої стратегії, яка дозволяє в порівнянні з іншими до 15 % зменшити витрати енергії вузлів в кластерах.

4. Запропонована вдосконалена траєкторно-позиційна модель передачі даних між телекомунікаційною платформою і вузлами кластера, яка враховує стан та взаємне розташування вузлів відносно траєкторії переміщення (положення у просторі) телекомунікаційної аероплатформи.

Траєкторно-позиційна модель передачі застосовує новий гібридний (децентралізований/децентралізований) протокол обміну даними між ТА і вузлами кластера:

децентралізований спосіб обміну – на етапі передачі вузлами запитів на обмін даними пріоритет передачі надається найбільш віддаленим вузлам від траєкторії переміщення ТА;

централізований спосіб обміну – ТА розраховує та реалізує графік передач вузлів кластера в залежності від об'єму даних моніторингу, енергії батареї та відстані між ними.

Запропоновані нові правила корегування траєкторії польоту ТА при обміні даними для досягнення певних цільових функцій управління мережею.

Результати моделювання показали, що запропонована траєкторна модель має незначну обчислювальну складність, дозволяє забезпечити збір даних зі всіх вузлів сенсорної мережі з заданою якістю, на 10 – 13 % збільшує час функціонування сенсорної мережі.

Позиційна модель ТА визначає положення ТА у просторі в залежності від взаємного розташування вузлів та обсягів даних моніторингу з врахуванням можливостей зміни швидкості передачі даних протоколом канального рівня. Результати моделювання показали, що застосування цієї моделі дозволяє зменшити час збору даних в кластері в середньому на 12 % або знизити витрати енергії вузлів на прийомопередачу до 15 %.

5. Вдосконалено метод збору даних моніторингу ТА з головних вузлів кластеризованої БСМ. Відмінність розробленого методу від відомих полягає в тому, що вперше запропоновано нові підходи до кластеризації мережі (нова множина метрик вибору головних вузлів для досягнення певних цільових функцій управління збором даних моніторингу, використання вдосконалених правил знаходження енергоефективних топологій кластерів методом спрямованого перебору варіантів та енергозалежних метрик вибору маршрутів при застосуванні зондового координатного методу маршрутизації в кластері), що дозволяє скоротити час збору даних моніторингу в середньому на 14 %, збільшити час функціонування мережі на 10 – 15 % у порівнянні з існуючими відповідного класу методами збору даних.

6. Запропонована методика оцінки ефективності методів збору даних з БСМ телекомунікаційними аероплатформами.

Суть методики полягає в тому, що запропоновано поєднати сукупність аналітичних моделей оцінки часу функціонування БСМ, часу збору даних моніторингу з імітаційною моделлю процесу функціонування підсистеми збору даних моніторингу системи управління БСМ.

За допомогою розроблених моделей проведені дослідження показників ефективності (час збору даних, час функціонування БСМ тощо) вдосконалених методів збору даних моніторингу в порівнянні з існуючими при різних вихідних даних: розмірність мережі, кількість кластерів, кількість вузлів в кластері тощо.

7. Практичне значення отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів полягає в тому, що розроблені методи, математичні моделі та алгоритми дозволяють:

визначати траєкторію (положення) телекомунікаційних аероплатформ для збору даних моніторингу з БСМ для досягнення різних цільових функцій управління мережею в режимі реального часу;

планувати траєкторії переміщення ТА для обміну даними з вузлами мережі; підвищити ефективність алгоритмічного та математичного забезпечення системи управління мережею.

Отримані в дисертації результати можуть бути використані:

1) організаціями-замовниками та науково-дослідними організаціями Міністерства оборони та Державної служби України з надзвичайних ситуацій при розробці тактико-технічних вимог до перспективних БСМ з ТА;

2) вищими навчальними закладами України, що займаються підготовкою спеціалістів з телекомунікаційних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sachin Kumar, Prayag Tiwari and Mikhail Zymbler Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review // Journal of Big Data (2019) 6:111, <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>.
2. Dan Popescu, Florin Stoican, Grigore Stamatescu, Oana Chenaru and Loretta Ichim A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring. Sensors 2019, 19 (21), 4690, <https://doi.org/10.3390/s19214690>.
3. Интернет вещей: Беспроводные сенсорные сети. Белая книга. Режим доступа: www.iec.ch/whitepaper/pdf/IEC_WP_Internet_of_Things_Wireless_Sensor_Networks_LR.pdf.
4. Бунин С.Г. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН Украины”. – 444 с.
5. Gupta Lav, Jain Raj, Vaszkun Gabor. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. IEEE Communications Surveys and Tutorials, Volume PP, November 2015.
6. Yong Zeng, Rui Zhang, Teng Joon Lim. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine, Vol. 54, no. 5, 2016.
7. Киричек Р.В. Разработка и исследование комплекса моделей и методов для летающих сенсорных сетей: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.13 / Киричек Руслан Викторович. – СПб, 2017. – 316 с.
8. Cheng Zhan, Yong Zeng, Rui Zhang. Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network // IEEE Wireless Communications Letters, Volume: PP, Issue 99, 2017.
9. Dac-Tu Ho, Esten Ingar Grøtli, P. B. Sujit, Tor Arne Johansen, João Borges Sousa. Optimization of Wireless Sensor Network and UAV Data Acquisition Journal of Intelligent & Robotic Systems, April 2015, Volume 78, Issue 1, pp 159 – 179.

10. Huseyin Okcu, Mujdat Soy Turk. Distributed Clustering Approach for UAV Integrated Wireless Sensor Networks, International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2014, Vol.15, No. 1 – 3, pp. 106 – 120.

11. Dac-Tu Ho, Esten Ingar Grotli, and Tor Arne Johansen Heuristic Algorithm and Cooperative Relay for Energy Efficient Data Collection with a UAV and WSN. http://folk.ntnu.no/torarnj/ho_2013.pdf.

12. Imad Jawhar, Nader Mohamed, Jameela Al-Jarood UAV-based data communication in wireless sensor networks: Models and Strategies, International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015.

13. Bilal Jan, Haleem Farman, Huma Javed, Bartolomeo Montrucchio, Murad Khan, and Shaukat Ali Energy Efficient Hierarchical Clustering Approaches in Wireless Sensor Networks: A Survey. Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2017, Article ID 6457942, 14 pages, <https://doi.org/10.1155/2017/6457942>.

14. Cheng Zhan, Yong Zeng, Rui Zhang. Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network // IEEE Wireless Communications Letters, Volume: PP, Issue 99, 2017.

15. Романченко І.С. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях / І.С. Романченко, С.Л. Данилюк, С.М. Чумаченко [та ін.]. – К: НАУ, 2016. – 232 с.

16. Розробка принципів побудови безпроводових сенсорних мереж із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища: Звіт про НДР № 0111U04806 / рук. роботи О.І. Лисенко. – К.: НТУУ „КПІ”, 2016.

17. Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації: Звіт про НДР № 0117U004282 / рук. роботи Л.О. Уривський. – К.: НТУУ „КПІ ім. Сікорського”, 2019.

18. Романюк А.В. Алгоритм временной кластеризации узлов беспроводных сенсорных сетей для сбора информации мониторинга с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Міжвідомчий науково-технічний збірник „Адаптивні системи

автоматичного управління”. – № 2 (33). – 2018. – С. 106 – 117.
<https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164680>.

19. Романюк А.В. Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 4. – С. 84 – 91.

20. Романюк А.В. Задачі управління збором даних моніторингу БПЛА в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 2. – С. 103 – 112.

21. Романюк А.В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури / А.В. Романюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67). – № 2, – 2017. – С. 49 – 54. ISSN 1606-3721.

22. Романюк А.В. Метод сбора информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ № 1. – 2018. – С. 75 – 85.

23. Романюк А.В. Модели оценки эффективности функционирования беспроводных сенсорных сетей / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 3 – С. 125 – 134.

24. Lysenko O. Optimal control of telecommunication airplatforms in the area of emergency / O. Lysenko, S. Valuiskyi, P. Kirchu, A. Romaniuk // Telecommunication Sciences. – 2013. – vol. 4. – № 1. – P. 14 – 20.

25. Валуйський С.В. Вдосконалений метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ / С.В. Валуйський, А.В. Романюк, В.Н. Петрова // Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». – 2014. – Вип. 7. – С. 25 – 34.

26. Сова О.Я. Методи обробки знань про ситуацію в мобільних радіомережах класу MANET для побудови вузлових інтелектуальних систем управління /

О.Я. Сова, В.А. Романюк, Д.А. Міночкін, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ. – 2014. – № 1. – С. 76 – 84.

27. Лисенко О.І. Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища / О.І. Лисенко, К.С. Козелкова, В.І. Новіков, Т.О. Прищеп, А.В. Романюк // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. – Вип. 10 (135). – С. 222 – 226. IndexCopernicus, GoogleScholar.

28. Sova O.Y. Hierarchical model of decision acceptance in intelligent manet control system / O.Y. Sova, V.A. Romanyuk, A.V. Romanyuk, O.I. Lysenko, I.V. Uryadnikova // Science & Military, Armed Forces Academy of General Milan Rastislav Stefanik, Liptovskiy Mikulas. No 1, Vol. 11, 2016. P. 14 – 20. ISSN 1336-8885(print). ISSN 2453-7632 (on-line). EBSCO.

29. Жук О.В. Аналіз методів управління топологією в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, Д.В. Ткаченко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 2. – С. 41 – 47.

30. Жук О.В. Моделі побудови покриття і виявлення цілей в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, В.В. Тарасов, Д.В. Ткаченко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 3. – С. 41 – 48.

31. Лисенко О.І. Методика оцінки показників функціонування епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами / О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, А.В. Романюк // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Техніка. – 2013. – № 6. – С. 46 – 61.

32. Стрела Т.С. Аналіз методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / Т.С. Стрела, О.В. Жук, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ № 3. – 2017. – С. 66 – 75.

33. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // Математичні машини і системи. – 2017. – № 2. – С. 15 – 23, РІНЦ. ISSN 1028-9763.

34. Жук О.В. Використання ефекту стохастичного резонансу під час передачі інформації в безпроводних сенсорних мережах. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського / О.В. Жук, А.В. Романюк, О.В. Байдур // Серія: Технічні науки. Том 28 (67). – № 1. – 2017. С. 15 – 18. ISSN 1606-3721.

35. Романюк А.В. Забезпечення стабільності пропускнуої здатності масштабованих ad-hoc мереж / А.В. Романюк, В.О. Давидюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67). – № 1. – 2017. – С. 35 – 40. ISSN 1606-3721.

36. Romaniuk V.A. Increasing the efficiency of data gathering in clustered wireless sensor / V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, A.V. Romaniuk, O.V. Zhuk // Information and Telecommunication Sciences. – №1. – 2020. – pp. 102 – 107.

37. Romaniuk A.V. Synthesis of data collection methods by telecommunication airplatforms in wireless sensors networks [Електронний ресурс] / A.V. Romaniuk, V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, M.K. Sparavalo, O.V. Zhuk // Information and Telecommunication Sciences. – № 2. – 2020. – pp. 63 – 73.

38. Романюк В.А. Концепция иерархического построения интеллектуальных систем управления тактическими радиосетями класса MANET / В.А. Романюк, О.Я. Сова, П.В. Жук, А.В. Романюк // Сборник тезисов докладов и выступлений участников XXII Международной Крымской конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо 2012). – Севастополь, 2012. – С. 265. **SCOPUS**.

39. Лысенко А.И. Синтез рациональной топологии сенсорной радиосети / Лысенко А.И., Валуйский С.В., Романюк А.В. // Материалы 23-й международной Крымской конференции (КрыМиКо 2013) „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь. – 2013. – Т. 1. – С. 269 – 270. **SCOPUS**.

40. Романюк А.В. Класифікація задач системи управління епізодичної радіомережі на основі телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк, С.В. Валуйський, О.І. Лисенко // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2015. – К.: НТУУ „КПІ”, 2015. – С. 381 – 383.

41. Романюк А.В. Використання інтелектуальних систем управління в сенсорних мережах із мобільними сенсорами / А.В. Романюк, О.І. Лисенко // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2016. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2016, – С. 465 – 467.

42. Романюк В.А. Алгоритм принятия решений по управлению тактической беспроводной сенсорной сетью / В.А. Романюк, А.И. Лысенко, Е.А. Степаненко, А.В. Романюк, А.В. Жук // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2018. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – С. 33 – 35.

43. Романюк А.В. Сбор информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с БПЛА / А.В. Романюк // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2018. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – С. 402 – 405.

44. Романюк А. Методи збору даних моніторингу від вузлів безпроводних сенсорних мереж з використанням БПЛА / А. Романюк, О. Лисенко, Т. Стрела // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Перспективи телекомунікацій” ПТ-2019. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – С. 333 – 335.

45. Романюк В. Способы повышения эффективности сбора данных мониторинга с использованием БПЛА при кластеризации беспроводных сенсорных сетей / В. Романюк, А. Лысенко, А. Романюк, А. Жук // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції „Перспективи телекомунікацій”. – 2020. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – С. 310 – 314.

46. O. Lysenko. Objective control functions of mobile ad-hoc networks using unmanned aerial vehicles / O. Lysenko, S. Danylyuk, A. Romanyuk, V. Romanyuk. // 3rd International Conference: Actual problems of unmanned aerial vehicles developments (APUAVD-2015) October 13-15, 2015. Organized by IEEE Ukraine Section Joint SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv). P. 243 – 246. **SCOPUS**.

47. Sova O. New strategies in using network OSI layer in manet functioning / O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, A. Lysenko, I. Uryadnikova // Usporiadatel' medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana

Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany. 22-26.02.2016, Liptovský Mikuláš, Slovakia. P. 359 – 365. ISBN 978-80-8040-515-1.

48. Sova O. Intelligent hierarchical model of the sensor and manet networks management system / O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, A. Lysenko, I. Uryadnikova // Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany. 22-26.02.2016, Liptovský Mikuláš, Slovakia. P. 349 – 358. ISBN 978-80-8040-515-1.

49. Романюк А.В. Интеллектуализация сенсорных сетей из мобильными сенсорами / А.В. Романюк, О.И. Лисенко // Четверта міжнародна науково-практична конференція „Відкриті еволюційні системи”. Збірник праць: Ч. 2. – Ніжин: ВНЗ ВП НУБіП України НАІ. – 2017. – С. 164 – 167. ISBN 978-617-640-267-1.

50. Romanyuk A. The hierarchical model of intelligent control system between intelligent agents in sensor networks and manet / A. Romanyuk, O. Lysenko, V. Romanyuk, O. Sova // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки UkrMiCo'2016 / UkrMiCo'2016, IEEE). ISBN 978-1-5090-4409-2. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739627. **SCOPUS**.

51. Samberg A. The control system of heterogeneous wireless sensor networks / A. Samberg, V. Romaniuk, A. Romaniuk, O. Lysenko, E. Stepanenko // The International Emergency Management Society Newsletter – Special Edition - ISSUE 5 – April 2017. A TIEMS Special Issue Covering, 12-13 October 2016. TIEMS First Conference in Ukraine. P. 9 – 14, ISSN 2033-1614.

52. Романюк А.В. Энергоэффективная метрика выбора маршрутов в бездротовых сенсорных сетях / А.В. Романюк // VI науково-технічна конференція „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2012. – С. 184 – 185.

53. Романюк А.В. Вдосконалені правила перерозподілу навантаження епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк // VII науково-технічна конференція „Пріоритетні

напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2014. – С. 156 – 157.

54. Романюк А.В. Інтеграція рівнів OSI в мережі MANET з телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // VIII Науково - практична конференція „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв’язку та автоматизації в АТО”, 2015. – С. 174 – 175.

55. Романюк А.В. Алгоритм синтезу топології епізодичної мережі радіозв’язку з використанням телекомунікаційних аероплатформ // IX Науково - практична конференція „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв’язку та автоматизації в АТО”, 2016. – С. 159 – 161.

56. Романюк А.В. Моделі оцінки часу функціонування бездротових сенсорних мереж / А.В. Романюк // X Науково - практична конференція „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв’язку та автоматизації в АТО”, 2017. – С. 210.

57. Романюк А.В. Методи збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // XI Науково - практична конференція „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв’язку та автоматизації в АТО”, 2018. – С. 197 – 198.

58. Zhuk A. Methodology of the Tactical Wireless Sensor Networks Control / A. Zhuk, V. Romanyuk, A. Romanyuk, E. Stepanenko // In Proc. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET-2018. (Lviv, 20 – 24 Feb. 2018). p. 201 – 202. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336374. **SCOPUS**.

59. Valuiskyi S. Improved Algorithm for Real Time Search of WSN Routers Placement / S. Valuiskyi, V. Novikov, T. Pryshchepa, A. Romaniuk // 4th International

Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016. – С. 72 – 75. **SCOPUS**.

60. Sathyaraj, B. Moses, et al. Multiple UAVs path planning algorithms: a comparative study. // Fuzzy Optimization and Decision Making, 2008, pp. 257 – 267.

61. Jodeh, Nidal M. "Optimal UAS Assignments and Trajectories for Persistent Surveillance and Data Collection from a Wireless Sensor Network" (2015). Theses and Dissertations. 242. <http://scholar.afit.edu/etd/242>.

62. IEEE Std 802.11. IEEE Standard for Information technology. Specific requirements. Part11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications. 2016.

63. Валу́йский С.В., Чумаченко С.М. Усовершенствований алгоритм поиска квазиоптимального размещения телекоммуникационных аэроплатформ в рамках поисково-спасательных работ при ликвидации последствий. Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. – № 5. – 2013. – С. 123 – 131.

64. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. – М: Мир, 1978.

65. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. – 270 с.

66. Воронцов К.В. Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования. Курс лекций. МГУ, 2007.

67. Гепко И.А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И.А. Гепко, В.Ф. Олейник, Ю.Д. Чайка, А.В. Бондаренко. – К.: ЭКМО, 2009. – 672 с.

68. P. Smith, "Comparing low-power wireless technologies," Tech Zone, Digikey Online Magazine, Digi-Key Corporation, vol. 701, 2011.

69. D.T Ho, J. Park, S. Shimamoto, J. Kitaori "Performance evaluation of multi hop relay network for oceanic air traffic control communication," IEICE Trans. on Commun. vol. E94-B, no. 1, pp. 86-96, Jan. 2011.

70. Andrea Goldsmith Wireless Communication, Cambridge University Press; 1 edition, 2005, 674 pages.

71. Викулов А.С. Введение в сети Wi-Fi с высокой плотностью пользователей/ А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. Т. 6. – № 1. – 2018.

72. Barbosa Alex V., Marcos F. Caetano, Bordim Jacir L. The Theoretical Maximum Throughput Calculation for the IEEE802.11 g Standard. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, vol. 11 No. 4, April 2011.

73. Florwick J., Whiteaker J., Amrod A. C., Woodhams J. Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. Cisco Systems. 2017.

74. A.-V. Vladuta, M.L. Pura, I. Bica. MAC Protocol for Data Gathering in Wireless Sensor Networks with the Aid of Unmanned Aerial Vehicles // Digital Object Identifier 10.4316/AECE.2016.02007.

75. T.D. Ho, J. Park, and S. Shimamoto “Novel Multiple Access Scheme for Wireless Sensor Network Employing UAV,” Proc. of IEEE/AIAA 29th DASC, Salt Lake, UT, Oct. 2010. DOI:10.1109/DASC.2010.5655304.

76. Dac-Tu Ho, Shigeru Shimamoto Highly reliable communication protocol for WSN-UAV system employing TDMA and PFS scheme. December 2011. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2011.6162401.

77. Abdel Ilah, Alshbatat and Liang Dong. Adaptive MAC Protocol for UAV Communication Networks Using Directional Antennas // International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2010, DOI: 10.1109/ICNSC.2010.5461589

78. Shams Rahman, You-Ze, Cho, Ajmal Khan. Positioning of UAVs for Throughput Maximization in Software Defined Disaster Area UAV Communication Networks Journal of Communications and Networks, · October 2018, DOI: 10.1109/JCN.2018.000070.

79. Erlend Larsen, Lars Landmark and Øivind Kure. Optimal UAV Relay Positions in Multi-Rate Networks // Published in Wireless Days, 2017, DOI:10.1109/WD.2017.7918107.

80. Хемди А. Таха. Введение в исследование операций. 7-е издание. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005.

81. Amin Shahraki, Amir Taherkordi, Øystein Haugen, Frank Eliassen Clustering objectives in wireless sensor networks: A survey and research direction analysis. June 2020. *Computer Networks* 180:107376. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107376.
82. Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *Proceedings of the 33rd International Conference on System Sciences (HICSS '00)*, Jan.2000.
83. Bandyopadhyay, S., Coyle, E.J., An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks, *INFOCOM Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*, Vol. 3, pages: 1713 – 1723, 2003.
84. Younis, O., Fahmy, S., Distributed Clustering in Ad-hoc Sensor Networks: A Hybrid, Energy-Efficient Approach, *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2004.
85. Ping Ding, Joanne Holliday, Aslıhan Çelik, „Distributed Energy-Efficient Hierarchical Clustering for Wireless Sensor Networks”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pages: 322 – 339, 2005.
86. Fazackerley, S., Paeth, A., Lawrence, R., „Cluster Head Selection Using RF Signal Strength”, *Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 334 – 338, 2009.
87. Pantziou G., Mpitziopoulos, A., Gavalas, D., Konstantopoulos, C., Mamalis, B. Mobile Sinks for Information Retrieval from Cluster-Based WSN Islands, *Proceedings of the 8th International Conference on Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks (ADHOC-NOW '09)*, pages: 213 – 226, 2009.
88. J. Pan. Topology Control for Wireless Sensor Networks / J. Pan, Y. T. Hou, L. Cai, Y. Shi, S. X. Shen // *In proceedings of ACM Mobicom'03*. – 2003.
89. Y. Xu. Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing / Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin // *In proceedings of ACM Mobicom*. – 2001.
90. B. Chen. Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks / B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris // *In proceedings of Mobicom*. – 2001.

91. C. Schurgers. Topology Management for Sensor Networks: Exploiting Latency and Density / C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, M. Srivastava // In proceedings of ACM Mobihoc. – 2002.
92. R. Zheng. Asynchronous Wakeup for Ad Hoc Networks / R. Zheng, J. C. Hou, L. Sha // In proceedings of ACM Mobicom. – 2003.
93. Wattenhofer R., Li L., Bahl P., Wang Y.-M. Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad-hoc Networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM, 2001.
94. Li X.-Y., Calinescu G., Wan P.-J. Distributed Construction of Planar Spanner and Routing for Ad Hoc Wireless Networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM, 2002.
95. Li X.-Y., Wan P.-J., Wang Y., Frider O. Sparse Power Efficient Topology for Wireless Networks // Journal of Parallel and Distributed Computing, 2002.
96. Миночкин А.И. Управление топологией мобильной радиосети / А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Зв'язок, 2003. – № 3. – С. 28 – 33.
97. Muhammad Yeasir Arafat, Md Arafat Habib and Sangman Moh Routing Protocols for UAV-Aided Wireless Sensor Networks. Appl. Sci. 2020, 10, 4077; doi:10.3390/app10124077.

Додаток А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу:

1. Sova O.Y. Hierarchical model of decision acceptance in intelligent manet control system / O.Y. Sova, V.A. Romanyuk, A.V. Romanyuk, O.I. Lysenko, I.V. Uryadnikova // Milan Rastislav Stefanik, Liptovskiy Mikulas. No 1, Vol. 11, 2016. P. 14 – 20. ISSN 1336-8885 (print). ISSN 2453-7632 (on-line). EBSCO. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні структури, параметрів управління в ієрархічній системі управління мережами типу manet).

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Романюк А.В. Алгоритм временной кластеризации узлов беспроводных сенсорных сетей для сбора информации мониторинга с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Міжвідомчий науково-технічний збірник „Адаптивні системи автоматичного управління”, № 2 (33). – 2018. – С. 106 – 117. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164680>.

3. Романюк А.В. Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 4. – 2018. – С. 84 – 91.

4. Романюк А.В. Задачі управління збором даних моніторингу БПЛА в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 2. – 2018. – С. 103 – 112.

5. Романюк А.В. Метод сбора информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ № 1. – 2018. – С. 75 – 85.

6. Романюк А.В. Модели оценки эффективности функционирования беспроводных сенсорных сетей / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 3. – 2017. – С. 125 – 134.

7. Lysenko O. Optimal control of telecommunication airoplatform in the area of emergency / O. Lysenko, S. Valuiskyi, P. Kirchu, A. Romaniuk // Telecommunication Sciences. – 2013. – vol. 4. – № 1. – P. 14 – 20. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні правил побудови топології БСМ з використанням ТА).

8. Валуйський С.В. Вдосконалений метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ / С.В. Валуйський, А.В. Романюк, В.Н. Петрова // Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». – 2014. – Вип. 7. – С. 25 – 34. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні пропозицій по вдосконаленню правил переміщення ТА для підвищення пропускної здатності ТА).

9. Сова О.Я. Методи обробки знань про ситуацію в мобільних радіомережах класу MANET для побудови вузлових інтелектуальних систем управління / О.Я. Сова, В.А. Романюк, Д.А. Міночкін, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ. – 2014. – № 1. – С. 76 – 84. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні процесу виробки рішень вузловими системами управління).

10. Лисенко О.І. Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища / О.І. Лисенко, К.С. Козелкова, В.І. Новіков, Т.О. Прищепа, А.В. Романюк // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. – Вип. 10 (135). – С. 222 – 226. IndexCopernicus, GoogleScholar. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні функцій та завдань підсистем системи управління БСМ з застосуванням ТА).

11. Жук О.В. Аналіз методів управління топологією в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, Д.В. Ткаченко // Збірник наукових

праць ВІТІ. – 2017. – № 2. – С. 41 – 47. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів побудови енергоефективної топології БСМ).

12. Жук О.В. Моделі побудови покриття і виявлення цілей в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, В.В. Тарасов, Д.В. Ткаченко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 3. – С. 41 – 48. (Особистий внесок здобувача полягає у побудові та дослідженні математичної моделі покриття цілій в БСМ).

13. Лисенко О.І. Методика оцінки показників функціонування епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами / О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, А.В. Романюк // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Техніка. – 2013. – № 6. – С. 46 – 61. (Особистий внесок здобувача полягає в аналізі показників оцінки функціонування радіомереж з самоорганізацією).

14. Стрела Т.С. Аналіз методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / Т.С. Стрела, О.В. Жук, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 3. – 2017. – С. 66 – 75. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів побудови методів енергоефективної маршрутизації в БСМ).

15. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // Математичні машини і системи. – 2017. – № 2. – С. 15 – 23, РІНЦ. ISSN 1028-9763. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні в визначенні задач управління БСМ, побудови нової архітектури управління БСМ).

16. Romaniuk V.A. Increasing the efficiency of data gathering in clustered wireless sensors networks [Електронний ресурс] / V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, A.V. Romaniuk, O.V. Zhuk // Information and Telecommunication Sciences. – №1. – 2020. – p. 102 – 107. – Режим доступу: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/206642>. (Особистий внесок здобувача полягає в пропозиціях про підвищенню ефективності методів збору даних моніторингу в БСМ з застосуванням ТА).

17. Romaniuk A.V. Synthesis of data collection methods by telecommunication airplatforms in wireless sensors networks [Електронний ресурс] / A.V. Romaniuk,

V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, M.K. Sparavalo, O.V. Zhuk // Information and Telecommunication Sciences. – № 2. – 2020. – p. 63 – 73. – Режим доступу: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/206642>. (Особистий внесок здобувача полягає у розробці складових синтезу методів збору даних моніторингу з БСМ ТА).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

18. Романюк В.А. Концепция иерархического построения интеллектуальных систем управления тактическими радиосетями класса MANET / В.А. Романюк, О.Я. Сова, П.В. Жук, А.В. Романюк // Сборник тезисов докладов и выступлений участников XXII международной Крымской конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо 2012). – Севастополь, 2012. – С. 265. SCOPUS. (Особистий внесок здобувача полягає у запропонуванні ідеї інтелектуалізації процесу управління мережами, що самоорганізуються).

19. Лысенко А.И. Синтез рациональной топологии сенсорной радиосети / А.И. Лысенко, С.В. Валуйский, А.В. Романюк // Материалы 23-й международной Крымской конференции (КрыМиКо 2013) „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь. – 2013. – Т. 1. – С. 269 – 270. SCOPUS. (Особистий внесок здобувача полягає у пропозиціях по постановці завдання дослідження та проведення моделювання).

20. Романюк А.В. Класифікація задач системи управління епізодичної радіомережі на основі телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк, С.В. Валуйський, О.І. Лисенко // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2015. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2015. – С. 381 – 383. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні задач управління БСМ з використанням ТА).

21. Романюк А.В. Використання інтелектуальних систем управління в сенсорних мережах із мобільними сенсорами / А.В. Романюк, О.І. Лисенко // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2016. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2016. – С. 465 – 467. (Особистий внесок здобувача полягає у розгляді процесу інтелектуалізації процесу управління БСМ).

22. Романюк В.А. Алгоритм принятия решений по управлению тактической беспроводной сенсорной сетью / В.А. Романюк, А.И. Лысенко, Е.А. Степаненко, А.В. Романюк, А.В. Жук // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2018. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – С. 33 – 35. (Особистий внесок здобувача полягає у розробці узагальненого алгоритму функціонування тактичною БСМ).

23. Романюк А.В. Сбор информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с БПЛА / А.В. Романюк // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2018. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – С. 402 – 405.

24. Романюк А. Методи збору даних моніторингу від вузлів безпроводних сенсорних мереж з використанням БПЛА [Електронний ресурс] / А. Романюк, О. Лисенко, Т. Стрела // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Перспективи телекомунікацій”. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – С. 333 – 335. – Режим доступу: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/168999>. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів збору даних моніторингу з вузлів БСМ з використанням ТА).

25. Романюк В. Способы повышения эффективности сбора данных мониторинга с использованием БПЛА при кластеризации беспроводных сенсорных сетей [Електронний ресурс] / В. Романюк, А. Лысенко, А. Романюк, А. Жук // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Перспективи телекомунікацій”. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2020. – С. 310 – 314. – Режим доступу: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/201711/201650>. (Здобувачем визначені основні напрями та методи підвищення ефективності збору даних з вузлів БСМ при використанні ТА).

26. Lysenko O. Objective control functions of mobile ad-hoc networks using unmanned aerial vehicles / O. Lysenko, S. Danylyuk, A. Romanyuk, V. Romanyuk // 3rd International Conference: Actual problems of unmanned aerial vehicles developments (APUAVD-2015) October 13-15, 2015. Organized by IEEE Ukraine Section Joint

SP/AES Chapter and the National Aviation University (Kyiv). P. 243 – 246. SCOPUS. (Здобувачем запропоновані цільові функції управління ТА).

27. Sova O. New strategies in using network OSI layer in manet functioning / O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, A. Lysenko, I. Uryadnikova // *Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika* Katedra bezpečnosti a obrany. 22-26.02.2016, Liptovsky Mikulas, Slovakia. P. 359 – 365. ISBN 978-80-8040-515-1. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу способів координації різних рівнів моделі OSI мереж з самоорганізацією).

28. Sova O. Intelligent hierarchical model of the sensor and manet networks management system / O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, A. Lysenko, Uryadnikova I. // *Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika* Katedra bezpečnosti a obrany. 22-26.02.2016, Liptovsky Mikulas, Slovakia. P. 349 – 358. ISBN 978-80-8040-515-1. (Здобувачем запропонована необхідність інтелектуалізації процесу управління мережами з самоорганізацією).

29. Романюк А.В. Інтелектуалізація сенсорних мереж із мобільними сенсорами / А.В. Романюк, О.І. Лисенко // Четверта міжнародна науково-практична конференція „Відкриті еволюціонуючі системи”. Збірник праць: Ч. 2. – Ніжин: ВНЗ ВП НУБіП України НАІ. – 2017. – С. 164 – 167. ISBN 978-617-640-267-1. (Здобувачем визначений спосіб інтелектуалізації процесу управління сенсорних мережах з мобільними вузлами).

30. Romanyuk A. The hierarchical model of intelligent control system between intelligent agents in sensor networks and manet / A. Romanyuk, O. Lysenko, V. Romanyuk, O. Sova // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки УкрMiCo'2016 / UkrMiCo'2016, IEEE). ISBN 978-1-5090-4409-2. Київ. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739627. SCOPUS. (Здобувачем розглянута ідея побудови інтелектуальних агентів управління в гібридних мережах).

31. Samberg A. The control system of heterogeneous wireless sensor networks / A. Samberg, V. Romaniuk, A. Romaniuk, O. Lysenko, E. Stepanenko // The International Emergency Management Society Newsletter – Special Edition - ISSUE 5 – April 2017. A TIEMS Special Issue Covering, 12-13 October 2016. TIEMS First Conference in Ukraine. P. 9 – 14, ISSN 2033-1614. (Здобувачем запропонована структура та функції системи управління неоднорідними БСМ).

32. Романюк А.В. Енергоефективна метрика вибору маршрутів в бездротових сенсорних мережах / А.В. Романюк // VI науково-технічна конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2012. – С. 184 – 185.

33. Романюк А.В. Вдосконалені правила перерозподілу навантаження епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк // VII науково-технічна конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2014. – С. 156 – 157.

34. Романюк А.В. Інтеграція рівнів OSI в мережі MANET з телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // VIII науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО”, 2015. – С. 174 – 175.

35. Романюк А.В. Алгоритм синтезу топології епізодичної мережі радіозв'язку з використанням телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк // IX науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО”, 2016. – С. 159 – 161.

36. Романюк А.В. Моделі оцінки часу функціонування бездротових сенсорних мереж / А.В. Романюк // X науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж

спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО", 2017. – С. 210.

37. Романюк А.В. Методи збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // XI науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО", 2018. – С. 197 – 198.

38. Zhuk A. Methodology of the Tactical Wireless Sensor Networks Control / A. Zhuk, V. Romanyuk, A. Romanyuk, E. Stepanenko // In Proc. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET-2018. (Lviv, 20 – 24 Feb. 2018). p. 201 – 202. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336374. SCOPUS. (Здобувачем запропонований алгоритм системи управління тактичною сенсорною мережею).

39. Valuiskyi S. Improved Algorithm for Real Time Search of WSN Routers Placement / S. Valuiskyi, V. Novikov, T. Pryshchepa, A. Romaniuk // 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016. С. 72 – 75. SCOPUS. (Здобувачем запропоновані правила розміщення телекомунікаційної аероплатформи, яка виконує функції маршрутизатора).

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

40. Романюк А.В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури / А.В. Романюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 2, 2017. – С. 49 – 54. ISSN 1606-3721.

41. Жук О.В. Використання ефекту стохастичного резонансу під час передачі інформації в безпроводних сенсорних мережах. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського / О.В. Жук, А.В. Романюк, О.В. Байдур // Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 1, 2017. – С. 15 – 18. ISSN 1606-3721. (Особистий внесок здобувача

полягає у пропозиції рішень щодо покращення процесу передачі між сенсорними вузлами).

42. Романюк А.В. Забезпечення стабільності пропускної здатності масштабованих ad-hoc мереж / А.В. Романюк, В.О. Давидюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 1, 2017. – С. 35 – 40. ISSN 1606-3721. (Особистий внесок здобувача полягає у запропонованих рішеннях щодо підвищення пропускної здатності в БСМ).

Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Державної установи
«Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»
Член-кореспондент НАН України
Ю.Л. Забулонов

«07» 11
М.П.



АКТ

впровадження результатів наукових досліджень
викладених у кандидатській дисертації Романюка А.В.,
виконаної у Національному технічному університеті України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(науковий керівник, професор Лисенко О.І.)

Комісія у складі д.г.н., с.н.с. Верховцева В.Г., д.т.н. с.н.с., Попова О.О., к.т.н., пров. н.с. Фаррахова О.В. склали цей акт, в тому, що наукова і практична цінність дисертації Романюка А.В. полягає в отриманні нових наукових та технічних результатів:

1. Вдосконалено існуючі технології для забезпечення функціонування безпроводових сенсорних мереж (БСМ) великої розмірності, де передача пакетів від кінцевого сенсора до шлюзу здійснюється шляхом багатократної ретрансляції проміжними сенсорами. При цьому виникають нові завдання, які полягають в маршрутизації пакетів, взаємному доступі до радіоресурсу множини безпроводових сенсорів, ефективному використанні обмежених енергетичних ресурсів сенсорних вузлів з батареями, забезпечення зв'язності БСМ на значних географічних територіях.

2. Вдосконалено метод безпосереднього збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами з наземних вузлів за рахунок побудови тимчасових кластерів БСМ (тимчасової топології наземно-повітряної мережі) телекомунікаційними аероплатформами (ТА). Застосування методу дозволяє отримати вигоди у часі збору даних моніторингу мережі на 10-15% у порівнянні з існуючими методами.

3. Вперше розроблено гібридний метод збору даних моніторингу мережею ТА за рахунок власної кластеризації вузлами БСМ та правил обльоту точок збору телекомунікаційними аероплатформами. Застосування методу дозволяє отримати вигоди за цими показниками мережі на 10-15% у порівнянні з існуючими методами

4. Результати роботи:

- сприятимуть створенню нових макетних зразків вузлів адаптивних БСМ, а також експериментальних зразків інтелектуальних роботизованих телекомунікаційних аероплатформ для доставки мобільних сенсорів в район моніторингу, а також ефективного збору інформації з цих сенсорів.

- можуть бути використані в діяльності інституту як методологічна основа інформаційно-телекомунікаційного забезпечення системи підтримки і прийняття рішення під час пошуково-рятувальних робіт в зоні природних та техногенних катастроф. Можливий економічний ефект складатиме до 300 тис. грн.

Даний акт не є основою для виплати грошової винагороди.

Начальник відділу

д.г.н. с.н.с.

Начальник відділу

д.т.н. с.н.с.

Провідний науковий співробітник

к.т.н.

В.Г. Верховцев

О.О. Попов

О.В. Фаррахов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора Інституту проблем
математичних машин і систем НАНУ
І.Ф.М.Н., професор В. П. Клименко

2021 р.



АКТ

впровадження результатів наукових досліджень
викладених у кандидатській дисертації Романюка Антона Валерійовича
на тему

„Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж
телекомунікаційними аероплатформами”,
виконаної у Національному технічному університеті України
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
(науковий керівник професор Лисенко О.І.)

Комісія у складі провідного наукового співробітника, д.т.н. Беха О.Д., старшого наукового співробітника, к.т.н. Волобоєва В.П. склали цей акт про використання у діяльності Інституту проблем математичних машин і систем НАН України результатів кандидатської дисертації Романюка А.В.

Комісія встановила наступне:

1. В дисертації обґрунтовано та розроблено комплекс методів, алгоритмічних і програмних засобів для реалізації безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з їх кластеризацією телекомунікаційними аероплатформами та збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами з головних вузлів кластеризованої безпроводової сенсорної мережі. Результати наукових досліджень викладених у дисертації дозволяють за мінімальний час отримати інформацію про події, що відбуваються у зоні надзвичайної ситуації (стан оперативного ландшафту, напрямки пошуку і шляхи рятування, розташування потерпілих та об'єктів небезпеки, пріоритетність надання допомоги, тенденції розвитку надзвичайної ситуації, супроводження та захист рятівників і медичного персоналу, локалізація мародерів та їх знешкодження, відновлення зв'язку та недопущення паніки).

2. З метою забезпечення заданої якості збору даних моніторингу вдосконалено траєкторно-позиційну модель передачі даних між телекомунікаційною аероплатформою і вузлами кластера. Вдосконалення досягнуто завдяки врахуванню як просторового положення, так і швидкості польоту телекомунікаційної аероплатформи, а також взаємного розташування сенсорних вузлів БСМ у зоні, що обслуговується платформою.

3. Результати дисертаційної роботи спрямовані на виконання постанови Кабінету міністрів України № 980 від 18 жовтня 2017 р. «Про затвердження середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2017-2021 роки». Результати роботи мають важливе прикладне значення та можуть бути використані в розробках Інституту проблем математичних машин і систем НАН України.

Даний акт не є основою для виплати грошової винагороди.

Провідний науковий
співробітник, д.т.н.

 О.Д. Бех

Старший науковий
співробітник, к.т.н.

 В.П. Волобоєв

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника Військового інституту
телекомунікацій та інформатизації імені
Героїв Крут з наукової роботи

к.т.н., доцент

Г. Радзівілов

«1» 02 2021 р.

АКТ

впровадження наукових результатів дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Романюка Антона Валерійовича на тему
«Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж
телекомунікаційними аероплатформами»

Комісія у складі: голова комісії – начальник кафедри АСУ д.т.н., с.н.с. Сова О.Я, члени комісії – доцент кафедри АСУ Троцько О.О., старший викладач кафедри АСУ Симоненко О.А. розглянула результати дисертаційної роботи Романюка А.В. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук та встановила наступне.

В даний час в рамках концепції «Інтернету речей» значний розвиток отримали сенсорні мережі, які побудовані на новітніх технологіях безпроводового зв'язку і знайшли своє застосування в різних сферах людської діяльності. Отримані в дисертації результати є актуальними для вирішення завдань створення та розвитку перспективних безпроводових сенсорних мереж (як цивільного так і військового призначення), які не мають телекомунікаційної інфраструктури загального користування.

Автором запропоновані вдосконалені методи збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з використанням телекомунікаційних аероплатформ. Відмінність вдосконалених методів полягає в новому підході до процесу кластеризації мережі та розробці моделей обміну даними вузлів кластерів з телекомунікаційними аероплатформами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання при створенні спеціалізованого програмного забезпечення системи управління збором даних телекомунікаційними аероплатформами з вузлів безпроводних сенсорних мереж різного призначення.

Отримані в дисертації результати будуть використані у навчальному процесі під час підготовки офіцерських кадрів за спеціальністю «Інформаційні системи та технології», а також в ході виконання науково-дослідних робіт державного замовлення при формуванні оперативно-тактичних вимог до перспективних безпроводових сенсорних мереж спеціального призначення.

Голова комісії: начальник кафедри АСУ
д.т.н., с.н.с.

О.Я. Сова

члени комісії:

доцент кафедри АСУ

О.О. Троцько

старший викладач кафедри АСУ

О.А. Симоненко

„ЗАТВЕРДЖУЮ”

Голова Асоціації фахівців цивільного захисту
Сергій ЧУМАЧЕНКО

« 7 » лютого 2021 р.



Акт

впровадження результатів наукових досліджень, що викладені у кандидатській дисертації Романюка Антона Валерійовича на тему „Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами”, виконаної у Національному технічному університеті України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
(науковий керівник професор Лисенко О.І.)

Комісія у складі голови - д.т.н., с.н.с. Чумаченка С.М., д.т.н., с.н.с. Яковлева Є.О., к.т.н. доцента Пономаренка С.О. склали цей акт, в тому, що результати дисертаційної роботи Романюка А.В. мають наступну науково-практичну значимість:

- є актуальними для оперативного моніторингу заданого району з метою оцінювання ризику виникнення надзвичайної ситуації;

- можуть бути використані в діяльності пошуково-рятувальних загонів як технологічна основа інформаційно-телекомунікаційного забезпечення системи підтримки і прийняття рішення під час пошуково-рятувальних робіт в зоні природних та техногенних катастроф. Можливий економічний ефект складатиме до 500 тис. грн.;

- використані в діяльності асоціації для макетування процесів конфігурації сенсорних мереж із використанням сучасних протоколів;

- дозволяють збільшити час функціонування сенсорної радіомережі у середньому на 15-20%, знизити енерговитрати витрати вузлів, шлюзів, маршрутизаторів і контролерів мережі у середньому на 13-15%, підвищити оперативність планування та перепланування мережі на порядок, зменшити вартість створення безпроводної сенсорної мережі в зоні стихійного лиха, що проектується, у середньому до 10% в порівнянні з кращими раніше відомими технологіями.

Цей акт не є основою для виплати грошової винагороди.

Д.т.н., с.н.с.

Євген ЯКОВЛЕВ

К.т.н., доцент

Сергій ПОНОМАРЕНКО

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ІТС КІІ ім. Ігоря Сікорського
 Михайло ІЛЬЧЕНКО
 2021 р.

Акт

впровадження у навчальний процес
 результатів дисертаційних досліджень Романюка Антона Валерійовича на тему
 „Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж
 телекомунікаційними аероплатформами”

Комісія у складі: голови комісії - завідувача кафедри телекомунікацій д.т.н., професора Кравчука С.О., та членів комісії: заступника завідувача кафедри телекомунікацій к.т.н., доцента Явіся В.С., професора кафедри телекомунікацій д.т.н., професора Лисенка О.І. встановила наступне:

1. Вдосконалений метод безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з їх кластеризацією телекомунікаційними аероплатформами;
2. Вдосконалений метод збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами з головних вузлів кластеризованої безпроводової сенсорної мережі;
3. Вдосконалена траєкторно-позиційна модель передачі даних між телекомунікаційною аероплатформою і вузлами кластера;

впроваджено у навчальний процес з дисциплін: „Теорія ймовірностей та математична статистика” (2-й курс), „Математичні моделі систем масового обслуговування” (4-й курс), „Математичні методи наукових досліджень в телекомунікація та радіотехніці” (доктори філософії), „Прикладні аспекти системного аналізу в телекомунікація та радіотехніці ” (доктори філософії).

Голова комісії _____
 Члени комісії: _____

Сергій КРАВЧУК

Валерій ЯВІСЯ

Олександр ЛИСЕНКО